

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Московский авиационный институт»
Национальный исследовательский университет

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Московский государственный технический
университет имени Н.Э. Баумана»

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН

Научный совет РАН по комплексной проблеме «Механика»

Научный совет РАН по механике деформируемого твердого тела

МЕЖДУНАРОДНАЯ МОЛОДЁЖНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

«XLVI ГАГАРИНСКИЕ ЧТЕНИЯ»

14-17 апреля 2020

СБОРНИК ТРУДОВ

СЕКЦИИ

Механика и моделирование материалов и технологий

МОСКВА, 2020

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Московский авиационный институт»
Национальный исследовательский университет**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Московский государственный технический
университет имени Н.Э. Баумана»**

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН**

Механика и моделирование материалов и технологий. Сборник трудов Секции
Международной молодёжной научной конференции «XLVI Гагаринские чтения»
14-17 апреля 2020, Москва, ИПМех РАН, 2020.-129 с.

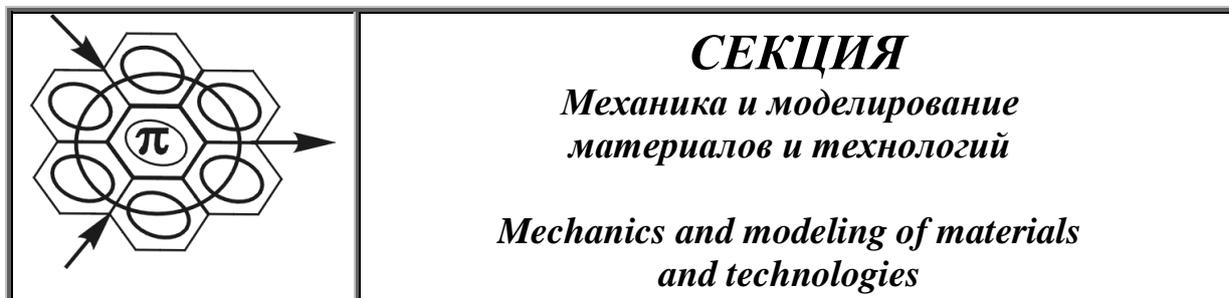
Сборник содержит материалы докладов, представленных на заседаниях Секции
Механика и моделирование материалов и технологий Международной молодёжной
научной конференции " XLVI Гагаринские чтения".

ISBN 978-5-91741-257-3

055(02)2 © Институт проблем механики РАН 2020 г.

МЕЖДУНАРОДНАЯ МОЛОДЁЖНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

«XLVI ГАГАРИНСКИЕ ЧТЕНИЯ»



Руководители *Климов Дмитрий Михайлович, г.н.с. лаборатории
секции: радиационной газовой динамики ИПМех РАН,
Академик РАН*

*Беклемишев Нил Нилович, зав. кафедрой «Физика
конструкционных материалов» МАИ (НИУ),
Заслуженный деятель науки РФ, проф., д.ф.-м.н.*

Учёный *Лямина Елена Алексеевна
секретарь: с.н.с. ИПМех РАН, к.ф.-м.н.
e-mail: gagarin@ipmnet.ru*

Члены *Волков М. А., к.ф.-м.н., н.с
локального Лисовенко Д. С., д.ф.-м.н., в.н.с.
оргкомитета: Мокряков В. В., к.ф.-м.н., н.с.
Ченцов А. В., к.ф.-м.н., с.н.с.*

Научные направления Секции:

- Модели материалов (в том числе наноматериалов, материалов с памятью формы).
- Методы определения свойств материалов.
- Связи макроскопических свойств материалов с их структурой.
- Механика и расчетно-экспериментальное моделирование технологических процессов: механика технологических процессов (модели, методы расчета, пакеты программ).
- Экспериментальная механика деформируемого твердого тела.
- Расчет и моделирование напряженного состояния, прочности и разрушения элементов конструкций.

Секция «Механика и моделирование материалов и технологий» создана в 1990е годы на основе базовой кафедры МАТИ в Институте проблем механики РАН (ИПМех РАН). Одним из создателей и соруководителем Секции был Роберт Вениаминович Гольдштейн (07.05.1940 – 24.09.2017), выдающийся ученый в области механики деформируемого твердого тела и ее приложений в технике и технологии, один из крупнейших отечественных ученых в механике прочности и разрушения конструкционных материалов. Приоритетом для Роберта Вениаминовича была поддержка и продвижение молодежной науки. За время работы секции более 500 участников – школьников, студентов, аспирантов и молодых ученых, - выступили с докладами. В дальнейшем многие из них остались в науке, защитили кандидатские и докторские диссертации, активно сотрудничают с лабораториями ИПМех РАН, и продолжают традиции молодежной науки в качестве научных руководителей. Вокруг секции за время ее существования сложился круг постоянных участников - ВУЗов и организаций, которые из года в год, вот уже несколькими поколениями студентов и аспирантов участвуют в проведении заседаний секции. Память о Роберте Вениаминовиче Гольдштейне, выдающемся ученом и организаторе науки, навсегда сохранится в наших сердцах.

В настоящем сборнике содержатся материалы докладов, представленных на заседаниях Секции «Механика и моделирование материалов и технологий» Международной молодежной научной конференции «XLVI Гагаринские чтения».

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ И АКУСТИЧЕСКИЕ ПРИЧИНЫ НАРУШЕНИЯ
СТАБИЛЬНОСТИ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ
ШИРОКОПОЛОСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Андросенко В.Н.

Научный руководитель — д.ф.-м.н. Якимов М.Ю.

МАИ, Москва

andros243@yandex.ru

Лазерно-плазменные источники широкополосного излучения высокой яркости на основе оптических разрядов находят все более широкое применение для исследования физических и химических свойств материалов в поляриметрии, эллипсометрии, микроскопии, абсорбционной спектроскопии и другие.

Стабильность излучения, важная для применений, определяется стабильностью характеристик плазмы оптических разрядов [1, 2]. В докладе на основе наблюдения теневыми методами конвективного факела непрерывного и импульсно-периодического оптических разрядов исследуются гидродинамические и акустические эффекты, вызывающие пульсации оптических разрядов.

Создаваемая оптическими разрядами бароклинность среды приводит к тому, что движение газа в окрестности оптического разряда, возникающее из-за термогравитационной конвекции, приобретает вихревой характер. Конвективный факел оказывается состоящим из последовательно всплывающих вихревых колец, в результате чего возникают регулярные пульсации скорости конвективного потока в зоне разряда, сопровождающиеся пульсациями положения и яркости плазмы. Частота наблюдаемых пульсаций растет с давлением газа [3]. Анализ экспериментальных результатов приводит к закону подобия для частоты пульсаций в соответствии с соотношением $\nu = 0.5(g/D)^{0.5}$, где g – ускорение свободного падения, D – диаметр конвективного факела. Это выражение совпадает с соотношением для пульсирующих пламен. Пульсации в случае оптических разрядов отличаются более высокими частотами вследствие большего давления газа и соответственно меньшего диаметра конвективного факела.

В импульсно-периодическом оптическом разряде с частотами повторения импульсов 1-40 кГц наблюдалось нарушение регулярности пульсаций факела термогравитационной конвекции, возникавшее вследствие возбуждения акустических колебаний с частотами, близкими к резонансным для данного разрядного объема как акустического резонатора. Были проведены расчёты резонансных частот для разрядного объема в приближении идеального сфероида. Расчетные частоты соответствуют наблюдаемым в ходе эксперимента. Резонансные частоты соответствуют трём типам колебаний: продольных, поперечных и радиальных, каждые из которых по-разному влияют на пульсации термогравитационного факела. Некоторые типы возникавших акустических колебаний подавляли колебания конвективного факела, другие приводили к их резкому росту, в некоторых случаях вплоть до срыва разряда.

Литература

1. Зимаков В. П., и др. // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2016. Т.17, вып. 2. <http://chemphys.edu.ru/issues/2016-17-2/articles/653/>
2. Зимаков В.П., и др. // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2018. Т.19, вып.4. <http://chemphys.edu.ru/issues/2018-19-4/articles/754/>
3. Lavrentyev S.Yu., et al. // 2019 J. Phys.: Conf. Ser. 1394 012012 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1394/1/012012/pdf>

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРА ПОВРЕЖДЕННОСТИ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ КРИВЫМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ

Арутюнян А.Р., Арутюнян Р.А., Саитова Р.Р.

СПбГУ, Санкт-Петербург
a.arutyunyan@spbu.ru, rigastr@yandex.ru

Рассматривается проблема ползучести и длительной прочности металлических материалов и сплавов. Под действием относительно низких напряжений и высоких температур металлические материалы становятся хрупкими и разрушаются с небольшой величиной остаточных деформаций. Эта проблема известна как проблема тепловой хрупкости металлов. Поскольку данный эффект наблюдается в элементах многих важных инженерных объектов, проблема хрупких разрушений стала предметом многочисленных теоретических и экспериментальных исследований. Для решения этой проблемы в механике материалов была введена концепция поврежденности. Для описания хрупкой области экспериментальной кривой долговременной прочности была предложена система простых кинетических уравнений для параметра поврежденности и деформации ползучести, а также был сформулирован критерий длительной прочности. В работах Л.М. Качанова [1], Ю.Н. Работнова [2] и Р.А. Арутюняна [3] для решения данной проблемы рассматривается система кинетических уравнений для параметра поврежденности и деформации ползучести. В данной работе предлагается определять изменения параметра поврежденности по экспериментальным кривым высокотемпературной ползучести. При этом формулируется только одно кинетическое уравнение для скорости ползучести для случая сжимаемой среды. Параметр поврежденности определяется из рассматриваемого кинетического уравнения и зависит от скорости ползучести и деформации ползучести. Аналогичным образом изменение параметра поврежденности определяется по решению Ю.Н. Работнова. Для описания экспериментальных кривых ползучести используются различные эмпирические зависимости в виде степенных, экспоненциальных и смешанных функций. Получены критерии длительной прочности при условии достижения параметра поврежденности критической величины. Для случая сжимаемой среды наблюдается более интенсивное накопление поврежденности и, соответственно, процессов разрушения, по сравнению с решением Ю.Н. Работнова.

Литература

1. Качанов Л.М. О времени разрушения в условиях ползучести // Изв. АН СССР. ОТН. 1958. № 8. С. 26-31.
2. Работнов Ю.Н. О механизме длительного разрушения // Вопросы прочности материалов и конструкций. М.: Изд-во АН СССР. 1959. С. 5-7.
3. Арутюнян Р.А. Проблема деформационного старения и длительного разрушения в механике материалов. СПб.: Изд-во СПбГУ. 2004. 252с.

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОТВЕРЖДЕНИЯ

Ахмедов Р.И., Гайфутдинов А.М.

Научный руководитель — Андрианова К.А.
КНИТУ-КАИ, Казань
renat.ahmedow2016@yandex.ru

Использование полимерных композиционных материалов в авиационной и космической промышленности требует высокую удельную прочность и высокое качество. Одним из перспективных направлений развития в этом направлении является контроль отверждения полимерной матрицы в процессе изготовления. Способность отслеживать ход отверждения полимерной матрицы позволяет избежать извлечения из оснастки недоотвержденного изделия, которое проявляет плохие физико-химические свойства.

Неразрушающие методы контроля позволяют оценивать прогресс отверждения ПКМ без ущерба для функциональности готовой детали. Многие из неразрушающих методов были исследованы до настоящего времени, однако единственным методом непосредственного неразрушающего контроля процесса пропитки и отверждения в режиме реального времени

является диэлектрический анализ. Отверждение эпоксидной смолы приводит к увеличению ионной вязкости материала. Диэлектрический анализ (DEA) контролирует изменяющиеся в процессе отверждения диэлектрические свойства испытываемого материала.

В данной работе были исследованы возможности применения контроля процесса отверждения полимерного связующего в ходе изготовления изделия из КМ. Использовался диэлектрический анализатор DEA 288 для управления режимом отверждения полимерных связующих и моделирования процесса отверждения реальной детали. В качестве объектов исследования были выбраны ряд связующих с различными вязкостями.

Метод диэлектрического анализа позволил проконтролировать весь цикл отверждения до и после гелеобразования связующего, что невозможно в методах ДСК и вискозиметрии. Выполнено моделирование процесса отверждения связующего для реальной детали в режиме реального времени.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ОРИЕНТАЦИИ РЕШЕТКИ НА ЭФФЕКТИВНЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДВУМЕРНЫХ АУКСЕТИЧЕСКИХ ЯЧЕЙСТЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Байкова Е.И.

Научный руководитель — к.ф.-м.н. Ченцов А.В.

МАИ, Москва

ekaterina_baikova_97@inbox.ru

В условиях современных реалий все чаще при создании новых конструкций из полимерных материалов остро встает вопрос о том, какими свойствами они будут обладать и какую пользу в использовании в различных сферах производства изделий могут принести. Для этого необходимо не только численно рассчитывать то или иное поведение материала в заданных условиях, но также иметь и ряд экспериментальных данных отдельных проявлений тех или иных конструкций. И экспериментальное изучение поведения двумерных ауксетических ячеистых конструкций из одного материала, но с различными ориентациями ячеистых систем также может принести пользу при создании в будущем более сложных композитных конструкций, способных найти применение в различных сферах.

В данной работе приведены результаты экспериментов по изучению эффективных механических свойств полимерного материала, который представляет собой двумерную ауксетическую ячеистую конструкцию, при одноосном растяжении.

Первые исследования, наглядно демонстрирующие влиянием угла поворота решеток двумерных ячеистых конструкций относительно изначального положения были численно смоделированы на бесконечной упругой плоскости с круговыми отверстиями [1]. В ходе этого моделирования было выявлено снижение влияния коэффициента Пуассона (ν) на эффективный коэффициент Пуассона (ν_{eff}) в зависимости от расстояния ячеек конструкции между собой (разброс значений уменьшается, таким образом эффективный коэффициент начинает определяться в большей степени именно ориентацией решетки), а также угла поворота системы отверстий относительно изначального положения (в определенных положениях геометрии наблюдается проявление анизотропии (различие свойств среды в различных направлениях внутри этой среды) упругих (в пределах упругой зоны) характеристик, а также могут появляться локальные экстремумы).

Возвращаясь к эксперименту, то он проводился над двумерными ауксетическими ячеистыми конструкциями. Ауксетическими называются материалы, которые, в ходе испытаний, имеют отрицательные значения коэффициента Пуассона. Это значит, что при растяжении материалы-ауксетики становятся толще в направлении, перпендикулярном приложенной силе. Происходит это из-за особенностей структуры ауксетиков, что деформируется при растяжении. Такое свойство может обуславливаться особенностями строения материала на молекулярном уровне или же определяться структурными особенностями материала на макроскопическом уровне (как пример, в нашем случае - особенность строения ячеистых конструкций). В ходе экспериментов на различных двумерных образцах (без изменений угла ориентации) [2, 3] было выявлено проявление исследуемыми образцами ауксетических свойств. В нашем случае это исследование было

расширено, и изучалось не только проявление самих свойств, но и зависимость проявления эффективных свойств от угла поворота решетки относительно начального положения (на 30, 45, 60 и 90 относительно начального положения, обозначаемого как положение 0).

Результаты показали, что эффективные механические свойства исследуемых двумерных ауксетических образцов из полиэтилена действительно меняются в зависимости от угла поворота решетки, что в дальнейшем может помочь находить необходимые параметры двумерных ячеистых конструкций, при которых они проявляли себя максимально возможным способом в условиях поставленных задач.

Литература

1. Мокряков В.В. Исследование зависимости эффективных податливостей плоскости с решеткой круговых отверстий от параметров решетки // Вычислительная механика сплошных сред. – 2010. – Т. 3, № 3. – С. 90-101
2. Chentsov A. V., Lisovenko D. S. Experimental study of auxetic behavior of cellular structure // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2018. Vol. 991, 012017. DOI: 10.1088/1742-6596/991/1/012017
3. Goldstein R.V., Lisovenko D. S., Chentsov A.V., Lavrentyev S.Yu. Experimental study of defects influence on auxetic behavior of cellular structure with curvilinear elements // Letters on materials. 2017. Vol. 7 (4), pp. 355-358. DOI: 10.22226/2410-3535-2017-4-355-358

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ОРЕБРЕННЫХ ПАНЕЛЕЙ

Бойко С.В., Ларичкин А.Ю.

ИГиЛ СО РАН, Новосибирск
svetaiyavoynen@gmail.com

Метод оптимизации Нелдера-Мида применен для расчета формообразования цилиндрического изгиба оребренной панели для получения целевой формы изделия с учетом распухания детали при снятии нагрузки. Рассмотрены два случая достижения целевой формы панели: в процессе пластичности и ползучести. Расчет панели основан на расчетах балок таврового сечения под действием чистого изгиба. Получены оптимальные параметры процесса деформирования цилиндрического изгиба оребренной панели.

Введение. Одной из актуальных проблем для авиа и космической отрасли - сохранение ресурса изделия на стадии его изготовления, уменьшение веса конструкции при сохранении эксплуатационных характеристик. Оребренные панели используют за счет своих пониженных весовых характеристик при достаточной прочности конструкции. Оребрение полотна заготовки может иметь Г-образные, Т-образные профили. «Вафельная» панель имеет оребрение в виде двух пересекающихся систем ребер, которая изготавливается механической обработкой из плиты. Чаще вафельную панель изготавливают при помощи фрезерования из толстых плит. Применяются такие панели для изготовления корпусов ракетносителей. Получение тонкостенных оребренных панелей методами фрезерования может привести к деформации всей панели из-за действия остаточных сжимающих напряжений, что делает актуальной задачу определения оптимальных параметров формообразования габаритных изделий.

В задачах формообразования деталей рассматривается два класса задач: прямые и обратные. В прямых определяется напряженно-деформированное состояние при заранее заданных силовых, внешних воздействиях на заготовку. Эти задачи необходимы для расчета параметров технологического оборудования. В обратных задачах определяются внешние усилия и перемещения заготовки для получения заданной геометрии изделия с учетом упругой разгрузки материала.

Прямые задачи рассматриваются в работах Соснина О.В., Никитенко А.Ф. [1], Горева Б.В. [2], Радченко В.П. [3], Раевской Г.А. [4], Бормотина К.С., Коробейникова С.Н. [5] и др. Обратная задача рассмотрена в [6]. Показано, что получение оребренных панелей сложной геометрии может осуществляться при помощи формовки толстой плиты в режимах ползучести с помощью перестраиваемого стержневого пуансона. Авторы моделируют процесс формовки толстой плиты, для которого необходимо задавать закон перемещения каждого стержня оснастки, чтобы получить упреждающую форму панели. Определено, что величина отклонения панели при разгрузке зависит от температурного режима формовки, свойств материала и способа деформирования. В качестве заданной формы панели взята панель двойной кривизны центроплановой части самолета. Построен итерационный метод решения относительно неизвестных перемещений точек поверхности панели, задающей упреждающую кривизну. Однако, в данной работе [6] и аналогичных работах по решению

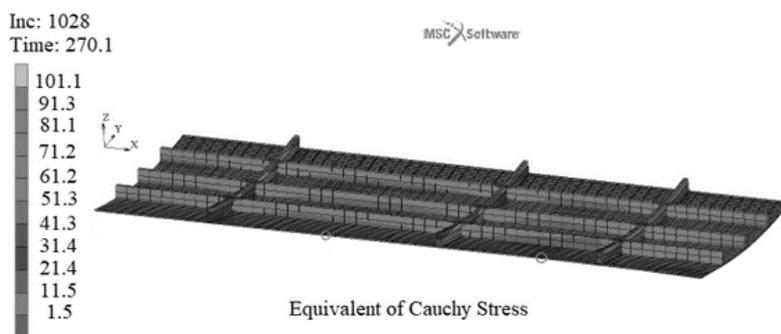
обратных задач процесс формообразования в режиме ползучести описывается не полностью, без учета повреждаемости материала. Учет данного параметра материала был включен в процесс формообразования цилиндрического изгиба оребренной панели для получения целевой формы изделия с учетом распружинивания детали при снятии разгрузки и рассмотрен в данной статье.

Метод. Рассматривается оребренная панель размером 417,5 x 1073,3 мм. Панель можно условно разбить на три составляющие - тавровые балки. Два тавра имеют длину основания 405 мм. Толщина ребер равняется 7,5 мм, высота вместе с основанием 25 мм. Основание имеет толщину 2 мм. Необходимо определить какие изгибающие моменты надо приложить к трем балкам таврового сечения для того, чтобы получить целевую кривизну детали радиуса $R = 2000$ мм.

Поиск момента проводится путем решения последовательности прямых задач чистого изгиба балок таврового сечения в процессе пластичности и ползучести с учетом поврежденности материала. На каждом шаге производится сравнение полученных кривизн с требуемым экспериментальным значением. Для поиска необходимых усилий использовался метод оптимизации Нелдера-Мида [7] с добавлением ограничений по времени формообразования элементов конструкций (рис.1а). Модуль написан в программе Visual Studio.



(а)



(б)

Рис.1. (а) Алгоритм метода обратной задачи; (б) Модель оребренной панели

Для каждой тавровой балки определялись свои усилия (изгибающие моменты) с учетом того, что поперечные ребра не влияют друг на друга (рис.1б). Далее с найденными моментами производилось трехмерное моделирование цилиндрического изгиба с учетом свойств пластичности и ползучести материала в конечно-элементном пакете MSC.Marc. Для задания свойств ползучести материала, не входящего в базу данных расчетного пакета, применялась пользовательская подпрограмма `cp1aw.f`. Моделирование формообразования панели в условиях пластичности в пакете MSC.Marc проводилось с учетом того, что материал считался идеально упругопластическим. Проводилось сравнение итоговых кривизн, полученных с использованием расчетного модуля и при трехмерном моделировании.

Результаты и обсуждение. В расчетах задавались следующие константы материала панели из сплава АК4-1 при температуре 200^oC: модуль упругости $E = 60$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$; предел текучести $\sigma_T = 170$ МПа. Процесс ползучести материала

описывается уравнением вида $d\varepsilon_+ / dt = (B_1 |\sigma|^{n_1-1} \sigma) / (A_{*1} - A)^{m_1}$, $\sigma > 0$ – при растяжении, где A_* – удельная работа рассеяния при разрушении; $d\varepsilon_- / dt = (B_2 |\sigma|^{n_2-1} \sigma) / (A_{*2} - A)^{m_2}$, $\sigma \leq 0$ – при сжатии. Характеристики ползучести материала: $B_1 = 8,96 \cdot 10^{-11} (МПа)^{n_1-r_1} ч^{-1}$, $n_1 = 7$, $r_1 = 7$ – для растяжения; $B_2 = 3,12 \cdot 10^{-11} (МПа)^{n_2-r_2} ч^{-1}$, $n_2 = 6$, $r_2 = 5$ – для сжатия; $A_* = 1$. Для удовлетворительного описания процесса ползучести при изгибе балок вплоть до разрушения вводился скалярный параметр поврежденности $\omega = A / A_*$.

В ходе решения последовательности прямых задач чистого изгиба тавровых балок в условиях пластичности были определены необходимые моменты усилий для каждой тавровой балки $M_1 = M_2 = -718,00 Нм$, $M_3 = -666,65 Нм$, а в случае ползучести $M_1 = M_2 = -273,47 Нм$, $M_3 = -256,40 Нм$.

Различие данных зависимости кривизны от времени тавровой балки №1 оребренной панели, полученные из модуля Visual Studio (сплошная линия рис.2) и конечно-элементного пакета MSC.Marc (штриховая кривая для рис.2) не превышает 4,14%. На рис.2 приведены два варианта получения целевой кривизны детали: пластическое деформирование (рис. 2а) и в процессе ползучести (рис. 2б), с последующей упругой разгрузкой изделия. При этом целевая кривизна панели равняется $0,0005 мм^{-1}$ (круглый маркер на рисунке 2). Стоит отметить, что при цилиндрическом изгибе оребренной панели ребра ортогональные к изгибаемым остаются ненагруженными. Оценка поврежденности материала $\omega = A / A_*$ в конечный момент времени в процессе ползучести достигла значения 0,24, а при пластичности – 0,56. Значения остаточных напряжений при пластическом деформировании превосходят таковые после процесса ползучести примерно в 2,5 раза.

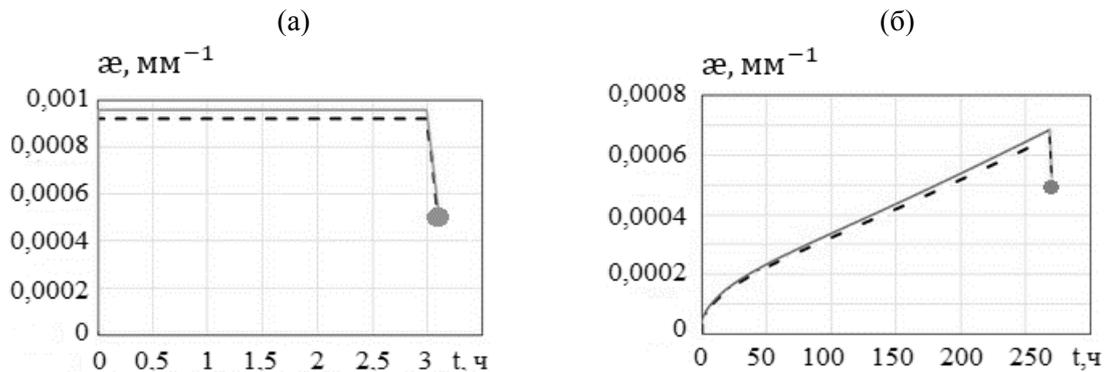


Рис.2. Изменение кривизны с течением времени в процессе пластичности (а) и ползучести (б) для тавровой балки №1, полученные при помощи расчетного модуля и пакета MSC.Marc.

Показана возможность определения изгибающих моментов, которые позволяют достигнуть целевую форму оребренной панели при цилиндрическом изгибе как в условиях ползучести (процесс изгиба до заданной кривизны при температуре $T=200^{\circ}C$ длится 270 часов) так и при пластическом деформировании.

Литература

1. Соснин О.В., Горев Б.В., Никитенко А.Ф. Энергетический вариант теории ползучести. – Новосибирск: Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева, 1986. – 96 с.
2. Горев Б.В. Высокотемпературная ползучесть конструкционных сплавов и ее приложение к формообразованию крупногабаритных деталей: диссертация ... доктора технических наук: 01.02.04. – Новосибирск, 2003. – 426 с.
3. Радченко В.П., Саушкин М.Н. Ползучесть и релаксация остаточных напряжений в упрочнённых конструкциях. – М.: Машиностроение, 2005. – 226 с.
4. Raevskaya G.A., Zakharchenko K.V., Larichkin A. Yu. Determination of optimum parameters of the technological process for plates forming from V95 and V-1461 alloys in creep applied in aircrafts constructed by “Sukhoi design bureau” // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. – 2017. – Vol. 894. – P. 012078.
5. Коробейников С.Н., Олейников А.И., Горев Б.В., Бормотин К.С. Математическое моделирование процессов ползучести металлических изделий из материалов, имеющих разные свойства при растяжении и

сжатию // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. – 2008. – Т. 9, № 1. – С. 346-365.

6. Бормотин К.С., Белых С.В., Аунг В. Математическое моделирование обратных задач многоточечного формообразования в режиме ползучести с помощью реконфигурируемого устройства // Вычислительные методы и программирование. – 2016. – Т. 17. – С. 258-267.

7. Nelder J. A., Mead R. A simplex for function minimization // Computer Journal. – 1965. – Vol.7 (4). – P. 308-313.

МЕТОД РАСЧЁТА НА ПРОЧНОСТЬ Z-ОБРАЗНОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО УПЛОТНЕНИЯ С ВРЕЗАЮЩИМИСЯ ЭЛЕМЕНТАМИ, ДЕФОРМИРУЕМОГО УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИ

Бойков А.А.

Научный руководитель — профессор, д.т.н. Шишкин С.В.

МАИ, Москва

a.boickov@yandex.ru

В системах трубопроводов авиационной и космической техники применяются фланцевые соединения с металлическими деформируемыми уплотнениями. В том числе и с Z-образными уплотнениями с врезающимися кромками. Предел текучести материала уплотнения значительно выше предела текучести материала фланцев. Поэтому, соединение герметизируется за счёт внедрения острых кромок Z-образного уплотнения в контактные поверхности фланцев. При этом материал фланца в зоне контакта деформируется пластически, а кромка уплотнения испытывает с его стороны высокое контактное давление. Поэтому, требуется оценка прочности уплотнения.

Основные допущения расчётной модели:

- Постоянство кромок уплотнения при их внедрении в материал фланца;
- Независимость контактных деформаций от общих деформаций уплотнения;
- Деформация уплотнения представляет собой простой поворот его сечения;
- Поскольку поворот уплотнения относительно мал, можно считать, что направление врезания кромок совпадает с вектором нагрузки.

С учётом принятых допущений для расчёта контактного взаимодействия уплотнения и фланца можно использовать решение Хилла о внедрении абсолютно жёсткого клина в пластическую среду.

Поскольку уплотнение является осесимметричным телом вращения, которое нагружено также осесимметрично, то для его расчёта на прочность удобно использовать теорию осесимметричной деформации колец К.Б. Бицено. Однако, основные зависимости теории применимы только для упругих деформаций, в то время как уплотнение подвергается упруго-пластическому деформированию. Поэтому, вместе с данной теорией необходимо применить метод переменных параметров упругости И.А. Биргера, который очень удобно реализуется в рамках имеющейся задачи и при оговоренных выше допущениях. Опасными будут являться краевые точки сечения уплотнения. Как раз там, где действует контактная нагрузка. Поэтому, следует спроецировать её на радиальное и осевое направление, после чего рассчитать интенсивность напряжений, а затем сравнить полученное значение с пределом прочности.

Таким образом, представленная методика расчёта позволяет оптимизировать конструкцию уплотнения, обеспечивая его надёжное функционирование при минимальной массе.

Литература

1. Хилл Р. Математическая теория пластичности. – М.: Гостехиздат, 1956. – 407 с.
2. Логинов В. Н. Метод переменных параметров упругости. Певзнеровские чтения: материалы VI Региональной научно-практической конференции (Комсомольск-на-Амуре, 02 – 03 ноября 2018 г.) с. 83 – 87.
3. Бояршинов С. В. Основы строительной механики машин. Учебное пособие для студентов вузов. – М.: «Машиностроение», 1973. – 456 с.
4. Письменный Д.Т. Конспект лекций по высшей математике. – М. АЙРИС – пресс, 2019. – 603 с.
5. Биргер И.А., Иосилевич Г.Б. Резьбовые и фланцевые соединения. – М.: «Машиностроение», 1990. – 368 с.: ил.

МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ КРАЕВОЙ ДИСЛОКАЦИИ В ТВЕРДОМ РАСТВОРЕ МЕДЬ-НИКЕЛЬ

Брюханов И.А.
НИИ Механики МГУ
ibryukhanov@gmail.com

С помощью молекулярно-динамического моделирования исследована подвижность краевой дислокации в сплавах твердого раствора Cu-Ni в широком диапазоне температур 100-1100 К и концентраций Ni 0-30%. Показано, что существует два разных режима влияния атомов Ni замещения на движение краевой дислокации. Когда движение дислокации обусловлено силами фоновго трения, то атомы Ni действуют как барьеры и замедляют движение дислокации. С повышением температуры сила торможения, связанная с атомами Ni, уменьшается и становится незначительной, начиная с 700 К. С ростом напряжения движение дислокации переходит в режим «насыщения» и ее скорость приближается к скорости звука в материале. В этом режиме, атомы Ni увеличивают скорость движения дислокации, что связано увеличением модуля сдвига твердого раствора Cu-Ni с концентрацией Ni.

Введение. Пластическая деформация металлов и сплавов определяется кинетикой движения и образованием дислокаций [1,2]. В зависимости от приложенного напряжения наблюдаются разные механизмы движения дислокаций. При низких напряжениях дислокации преодолевают барьеры Пайерлса-Набарро и различные виды препятствий в результате совместного действия приложенного напряжения и тепловых колебаний. В этом режиме предел упругости уменьшается с температурой. Когда приложенное напряжение выше, чем напряжение для преодоления самого сильного барьера, движение дислокации является контролируемым силами сопротивления фоновной вязкости [2].

Хорошо известно, что присутствие атомов замещения увеличивает пороговое напряжение начала безбарьерного движения дислокаций. Этот эффект называется твердорастворным упрочнением [3]. Влияние примесных атомов замещения на динамическое торможение дислокаций изучено в меньшей степени. Молекулярно-динамическое моделирование движения одиночных краевых и винтовых дислокаций в некоторых сплавах ГЦК структуры Ni-Al [4], Ni-Au [5] Al-Mg [6] показывает увеличение коэффициента фоновго трения с концентрацией растворенного вещества. Однако, для твердого раствора ОЦК структуры Fe-Cu коэффициент фоновго трения практически не зависит от концентрации Cu [7]. Известно, что коэффициент фоновго трения для многих чистых металлов пропорционален температуре. Для металлов с растворенными примесями влияние температуры на движение дислокации изучено в меньшей степени.

В настоящей работе изучается влияние примесей на подвижность краевой дислокации в меди в широком диапазоне температур и касательных напряжений на примере сплава Cu-Ni, который обладает растворимостью во всем диапазоне концентраций Ni.

Методы. Рассматривается идеальная решетка ГЦК меди с краевой дислокацией вдоль оси z [1-12] с вектором Бюргерса [110] вдоль оси x . Идеальная краевая дислокация создается путем объединения двух блоков, которые отличаются на один атомный слой в направлении вектора Бюргерса [110]. Противоположная деформация применяется к большим и меньшим блокам, чтобы отрегулировать их длины вдоль направления вектора Бюргерса. Вдоль направлений линии дислокации z [1-12] и скольжения x [110] используются периодические граничные условия. Вдоль оси y [-111] система неперриодична, и имеются две свободные границы. Размер системы в основных расчетах выбирается равным $35 \times 22 \times 22 \text{ нм}^3$ что соответствует примерно $1\,500\,000$ атомов. Металлы Ni и Cu имеют ГЦК-структуру с близкими параметрами решетки 3.52 и 3.61 \AA , соответственно. Для создания твердого раствора Cu-Ni атомы Cu случайным образом заменяются атомами Ni с концентрациями 5, 10, 20, 30%.

Для имитации движения дислокации внешние силы вдоль оси x прикладываются к каждому атому нижнего и верхнего буферных слоев. Величина внешней силы равна $\sigma(t)A/N$, где A - площадь плоскости xz , а N - общее количество атомов в верхнем и нижнем буферных слоях. Приложенное напряжение сдвига $\sigma(t)$ увеличивается от нуля до максимального целевого значения σ в течение интервала времени линейного изменения. Это позволило уменьшить колебания сдвигового напряжения на первых этапах моделирования. Буферные слои рассматриваются как твердые тела, движение которых

происходит только в плоскости свободной поверхности. Моделирование выполнялось в ансамбле NVE при температуре от 100 до 1100 К. Использовался потенциал EAM для системы Cu-Ni [8]. Величина шага интегрирования 1 фс. Положение дислокации определялось с использованием алгоритма DXA, реализованного в программном обеспечении OVITO [9]. Молекулярно-динамические расчеты проводились в пакете LAMMPS [10].

Результаты. Во время релаксации краевая дислокация диссоциирует на две частичные дислокации Шокли, что характерно для ГЦК-металлов. С увеличением содержания Ni расстояние между частичными дислокациями уменьшается, так как Ni имеет более высокую энергию дефекта упаковки, чем Cu: 129 и 45 мДж/м², соответственно [8]. Изначальная прямая краевая дислокация с увеличением концентрации Ni становится более изогнутой. С ростом температуры увеличивается как расстояние между частичными дислокациями, так и «волнистость» дислокационных линий.

Для каждого расчета определялось положение каждой частичной дислокации во времени. Скорость всей краевой дислокации определялась по среднему положению двух дислокаций вдоль оси *x*. Ширина дислокации колеблется вокруг среднего значения, которое не зависит от скорости дислокации. Когда приложенное напряжение ниже, чем напряжение Пайерлса, то дислокация перестает заметно смещаться через некоторое время после начала расчета. Значение напряжения, при котором дислокация начинает двигаться, увеличивается с концентрацией Ni. Разница между напряжениями Пайерлса для разных твердых растворов Cu-Ni особенно заметна при низких температурах ниже 500 К. С ростом температуры значения критического напряжения уменьшаются для всех твердых растворов Cu-Ni, и при высоких температурах значения напряжения становятся практически равными друг другу.

При значениях промежуточного напряжения выше порогового напряжения наблюдается вязкий режим движения дислокаций, в котором зависимости скорости дислокации от напряжения близки к линейным для всех твердых растворов Cu-Ni. Скорость дислокации уменьшается с концентрацией Ni в этом режиме. С ростом температуры влияние примесей Ni становится все менее и менее выраженным. При высоких температурах 900 К и 1100 К скорости дислокаций для всех сплавов Cu-Ni одинаковы и следуют той же линейной зависимости от напряжения.

При более высоких значениях напряжения скорость дислокации «насыщается», выходя на постоянное значение, близкое к поперечной скорости звука (рис. 1). В этом режиме влияние растворенных Ni на движение дислокации меняется на противоположное. Вместо того, чтобы тормозить дислокацию, атомы Ni ускоряют ее, и с увеличением концентрации Ni скорость дислокации увеличивается.

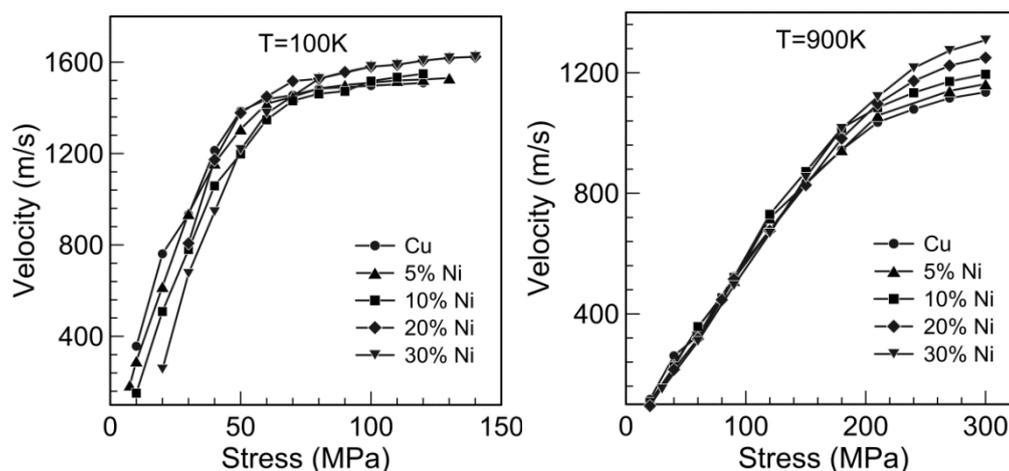


Рис.1. Зависимость скорости краевой дислокации (m/s) от приложенного сдвигового напряжения (MPa) при различных концентрациях Ni в меди.

Значение критической скорости, при которой происходит смена влияния Ni, уменьшается с температурой. При 900 К этот переход наблюдается при 800 м/с, что значительно ниже поперечной скорости звука при этой температуре (~1200 м/с). При высоких температурах

скорость дислокации сначала практически не зависит от концентрации Ni, но затем, при больших напряжениях, она увеличивается с ростом содержания Ni. Можно предположить, что движение дислокации при высоких скоростях определяется скоростью звука в материале. Скорость звука в меди увеличивается с ростом концентрации Ni, поэтому увеличивается и максимальная скорость движения дислокации.

Расчеты были проведены на суперкомпьютерном комплексе «Ломоносов» [11].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-71-00080.

Литература

1. Судзуки Т., Есинога Х. Т.С. Динамика дислокаций и пластичность. 1989.
2. Hirth J.P., Lothe J. Theory of Dislocations. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1982.
3. Neuhäuser H., Schwink C. Solid Solution Strengthening // Materials Science and Technology. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006.
4. Rodary E. et al. Dislocation glide in model Ni(Al) solid solutions by molecular dynamics // Phys. Rev. B. 2004. Vol. 70, № 5. P. 054111.
5. Marian J., Caro A. Moving dislocations in disordered alloys: Connecting continuum and discrete models with atomistic simulations // Phys. Rev. B. 2006. Vol. 74, № 2. P. 024113.
6. Olmsted D.L. et al. Atomistic simulations of dislocation mobility in Al, Ni and Al/Mg alloys // Model. Sim. Mater. Sci. Eng. 2005. Vol. 13, № 3. P. 371–388.
7. Tapasa K., Bacon D.J., Osetsky Y.N. Computer simulation of dislocation–solute interaction in dilute Fe–Cu alloys // Model. Simul. Mater. Sci. Eng. 2006. Vol. 14, № 7. P. 1153–1166.
8. Onat B., Durukanoglu S. An optimized interatomic potential for Cu–Ni alloys with the embedded-atom method // J. Phys. Condens. Matter. 2014. Vol. 26, № 3. P. 035404.
9. Stukowski A. Visualization and analysis of atomistic simulation data with OVITO—the Open Visualization Tool // Model. Simul. Mater. Sci. Eng. 2010. Vol. 18, № 1. P. 015012.
10. Plimpton S. Fast Parallel Algorithms for Short-Range Molecular Dynamics // J. Comput. Phys. 1995. Vol. 117, № 1. P. 1–19.
11. Sadovnichy V. et al. “Lomonosov”: Supercomputing at Moscow State University // Contemporary High Performance Computing: From Petascale toward Exascale / ed. Vetter J.S. Boca Raton, USA: CRC Press, 2013. P. 283–307.

К ВОПРОСУ О СХОДИМОСТИ ИТЕРАЦИОННОЙ ПРОЦЕДУРЫ РЕШЕНИЯ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ ЛАМЕ

Бухалов В.И., Попов А.Л.

ИПМех РАН

vlad.buhalov@yandex.ru

В работе представлен итерационный метод решения упругопластической задачи Ламе, который состоит в явном аналитическом представлении для напряжений в пластической области и итерационной процедуры упругого аналитического решения при заранее неизвестной границе пластической зоны. Аналитически показана сходимость данного метода при малых упругопластических деформациях. При больших упругопластических деформациях, сходимость при конкретном значении нагрузки находится путем реализации численной процедуры, а затем аналитически – при малом отличии заданной нагрузки от выбранного конкретного значения.

Введение. Аналитическое решение упругопластических задач получено в ограниченном числе постановок. Это относится, например, к упругопластической задаче Ламе. В [1,2] предложена итерационная процедура полуаналитического решения более общей упругопластической задачи Кирша. Сходимость этого решения оценивалась численно на решении упругопластической задачи Ламе.

Ниже рассмотрены возможности аналитического доказательства сходимости итерационной процедуры упругого аналитического решения при заранее неизвестном положении границы пластической зоны.

Сходимость итерационного решения упругопластической задачи Ламе при малых упругопластических деформациях. Рассмотрим процедуру итерационного решения упругопластической задачи Ламе. Для этого рассмотрим кольцо, внутренний и внешний радиусы которого обозначим через a и b , находящееся под действием равномерной внешней нагрузки $P_0 > \sigma_Y / 2$, при которой возникает пластическая зона радиуса r_T (Рис. 1а) (σ_Y - предел текучести материала кольца).

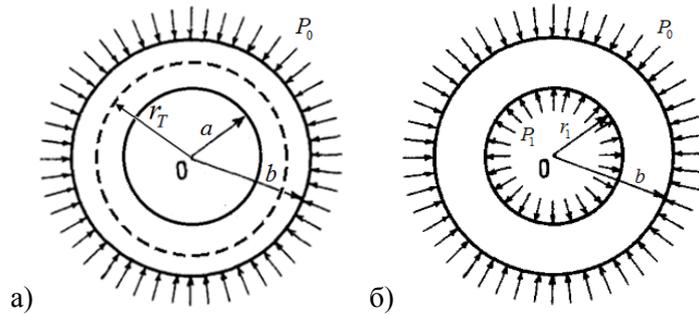


Рис.1. Условия постановки упругопластической задачи Ламе.

Первое приближение для радиуса пластической зоны $r_1 = r_T$ находится из решения исходной упругой задачи Ламе при равенстве эквивалентного напряжения пределу текучести материала кольца [2]:

$$r_1^4 = \frac{3P_0^2 a^4 b^4}{\sigma_Y^2 (b^2 - a^2)^2 - P_0^2 b^4}, \quad (1)$$

Во втором приближении решается задача Ламе для оставшейся упругой части кольца (рис. 1б) с внутренним давлением P_1 , равном радиальной компоненте напряжения в пластической зоне σ_r^p ; последняя может быть выражена через некоторую функцию $0 \leq \psi(r) < \pi/3$ [3]:

$$\sigma_r^p = -\frac{2 \sin \psi}{\sqrt{3}} \sigma_Y, \quad r = a \frac{\sqrt[4]{3} \exp(\psi \sqrt{3}/2)}{\sqrt{2} \sqrt{\sin(\pi/3 - \psi)}}, \quad (2)$$

Определив из (2) значение $\psi = \psi_1$ при $r = r_1$, получим для P_1 величину:

$$P_1 = \frac{2 \sin \psi_1}{\sqrt{3}} \sigma_Y, \quad (3)$$

Второе приближение для радиуса пластической зоны находится из решения упругой задачи Ламе о действии на кольцо $r_1 \leq r \leq b$ нагрузок P_0 и P_1 при равенстве эквивалентного напряжения пределу текучести материала кольца [2]:

$$r_2^4 = \frac{3(P_0 - P_1)^2 r_1^4 b^4}{\sigma_Y^2 (b^2 - r_1^2)^2 - (P_1 r_1^2 - P_0 b^2)^2}, \quad (4)$$

Далее итерационная процедура (2) - (4) продолжается до тех пор, пока последующее значение радиуса границы пластической зоны практически не будет отличаться от предыдущего значения.

При малых уровнях пластичности сходимость итерационной процедуры может быть показана аналитически.

1. Рассмотрим сначала предельный случай, когда $P_0 = \sigma_Y/2$. Тогда, принимая для наглядности $b^2 \gg a^2$, из (2) получим $r_1 = r_T = a$ и $\psi_1 = 0$. Соответственно, из (3) следует $P_1 = 0$. Таким образом, итерационная процедура останавливается на первом шаге. Полученное значение радиуса пластической зоны совпадает с радиусом внутреннего контура кольца, что соответствует точному решению упругопластической задачи Ламе при $P_0 = \sigma_Y/2$ [2].

2. Рассмотрим случай, когда $P_0 = (\sigma_Y/2)(1 + \varepsilon)$; при этом $\varepsilon \ll 1$, $\varepsilon > 0$. Из формулы (1), отбрасывая члены высших порядков малости, получим:

$$r_1 = a(1 + 2\varepsilon/3) \quad (5)$$

Подставляя это значение радиуса пластической зоны во второе равенство (2), имеем трансцендентное уравнение относительно ψ_1 :

$$1 + \frac{2\varepsilon}{3} = \frac{\sqrt{\sqrt{3}} \exp(\psi_1 \sqrt{3}/2)}{\sqrt{2} \sqrt{\sin(\pi/3 - \psi_1)}}, \quad (6)$$

Ранее было установлено, что при $P_0 = \sigma_y/2$ на границе области пластичности $\psi_1 = 0$. При малом увеличении нагрузки естественно ожидать, что значение функции ψ на границе области пластичности будет мало отличаться от нуля. Примем её равной $\psi_1 = k\varepsilon$, где $k = O(1)$. Тогда, раскладывая числитель и знаменатель правой части (6) в ряды Маклорена и отбрасывая члены высших порядков малости, найдем, что $k = 1/\sqrt{3}$.

Соответственно, из (3) имеем:

$$P_1 = 2\varepsilon\sigma_y/3 \quad (7)$$

Подставляя значения r_1 и P_1 из (5) и (7) в выражение (4), получим значение радиуса r_2 , совпадающее с r_1 , что свидетельствует о сходимости итерационной процедуры при малой пластичности уже на втором шаге.

Сходимость итерационного решения упругопластической задачи Ламе при больших упругопластических деформациях. Рассмотрим случай, когда $P_0 = K_0\sigma_y$, где $0.5 < K_0 < 1$. Решая итерационную задачу, из (1) определим радиус пластической зоны в первом приближении:

$$r_1 = a\sqrt[4]{3K_0^2/(1-K_0^2)} \quad (8)$$

Во втором приближении, подставляя (8) в (2), получим трансцендентное уравнение относительно $\psi = \psi_1$:

$$\frac{K_0^2}{1-K_0^2} = \frac{1 \exp(\psi_1 2\sqrt{3})}{4 \sin^2(\pi/3 - \psi_1)} \quad (9)$$

Это уравнение не имеет явного решения. Поэтому рассмотрим численно один из промежуточных случаев, например $K_0 = 1/\sqrt{2}$. При этом значении K_0 величина $r_1 = r_{10} = 1,303a$. Далее из (9) определяем $\psi_1 = 0,215$, а затем из (2) $P_1 = 0,246\sigma_y$. Подставляя найденные значения P_1 и r_1 в (4), определяем радиус пластической зоны во втором приближении $r_2 = 1,367a$. Повторяя данную процедуру еще один раз получим $\psi_2 = 0,251$, $P_2 = 0,287\sigma_y$, $r_3 = 1,38a$, откуда видно, что отношения $a/r_1, r_1/r_2, r_2/r_3$ равны 0,76, 0,95, 0,99. Таким образом, начиная с третьей итерации величина радиуса пластической зоны практически не изменяется.

Аналогично случаю малых пластических деформаций можно аналитически показать, что когда $K_0 = (1+\delta)/\sqrt{2}$, $\delta \ll 1$, $\delta > 0$, то выражения для радиусов пластической зоны будут отличаться от найденных при конкретном значении K_0 наличием слагаемого порядка δ . Так например значение радиуса в первом приближение даст величину $r_1 = a(1,303 + 0,99\delta)$.

Работа поддержана грантом РФФИ № 19-31-90058.

Литература

1. Александров С.Е., Бухалов В.И., Попов А.Л. Итерационное решение упругопластической задачи Ламе // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Уфа, 19-24 авг. 2019 г. Сб. Тр. – Уфа: РИЦ БашГУ, 2019. – С. 197.

2. Бухалов В.И., Попов А.Л. Разработка итерационной процедуры решения задачи Кирша в упругопластической постановке // Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики». Воронеж 11-13 ноября 2019 г. Сб. Тр. – Воронеж: Науч.-исслед. публ., 2020.—С. 1273–1278.

3. Alexandrov S. Elastic/plastic discs under plane stress conditions / S. Alexandrov – Berlin: Springer, 2015. – P. 114.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ЭЛЕКТРОКРИСТАЛЛИЗАЦИИ ОБЛАСТЕЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Бычков П.С.

ИПМех РАН

bychkov@ipmnet.ru

В работе предложена методика определения остаточных напряжений при электрокристаллизации областей сложной формы. Дан краткий обзор методов, используемых для этого в настоящее время. В отличие от известных методов предлагаемая методика позволяет получить детальную картину движения поверхности тонкой подложки, на которую производится осаждение и идентифицировать закон эволюции несовместных локальных деформаций в системе подложка – осажденный слой. В качестве идентифицируемых зависимостей используются решения краевой задачи для растущей по толщине пластины. Для определения смещения точек подложки используется голографическая интерферометрия в реальном времени.

Введение. При электрокристаллизации металлов и сплавов из водных растворов в осажденном слое и подложке возникают внутренние напряжения, которые влияют на свойства получившихся изделий и могут привести к их растрескиванию и отслоению. В этой связи измерение возникающих напряжений имеют большое теоретическое и прикладное значение. Физические причины появления напряжений точно не установлены, но различные авторы указывают на влияние изменения параметров кристаллической решетки осажденного слоя из-за тепловых явлений и включений инородных атомов, изменения размеров кристаллов и расстояний между ними во время осаждения, а также образование химических соединений внутри осадка, ведущих к локальному изменению объема [1].

Методы, используемые в настоящее время. Промышленное применение электролитического осаждения металла началось в 40-50 годах 19 века, и практически сразу исследователи и инженеры стали обмениваться наблюдениями отслоения и растрескивания покрытий вследствие внутренних напряжений, возникающих в осажденном слое. Пионерской работой по измерению величины этих напряжений была работа Мильса, изданная в 1877 году. В ней он предложил метод измерения, названный впоследствии методом деформации стеклянного шарика, суть которого сводилась к наблюдению за уровнем столбика ртути внутри термометра, на нижнюю сферическую поверхность которого происходит осаждение металла, причем вторым термометром осуществлялась термокомпенсация. Самый же распространенный метод измерения внутренних напряжений, названный впоследствии методом изгиба катода, предложил Стони в 1909 году [2]. Осаждая никель на одну из сторон закрепленной с одного края стальной линейки, он измерял отклонение второго ее края. Для тонкого осажденного слоя Стони получил формулу

$$P = \frac{4}{3} \frac{Ed^2z}{tl^2},$$

где P - напряжения на единицу площади, E - модуль Юнга стальной линейки, d - толщина линейки, z - стрела прогиба линейки, t - толщина осажденного слоя, l - длина линейки. Для определения напряжений в слое значительной толщины Стони предлагает формулу

$$P = \frac{4}{3} E \frac{(d^2 + td)z}{tl^2}$$

Формулы Стони были выведены в предположении что модули упругости подложки и осадка близки, а напряжения являются постоянными для всей площади линейки. В последующем, авторы, в основном, либо предлагали приемы для увеличения точности измерения стрелы прогиба линейки, либо определяли пределы применимости, либо уточняли формулы Стони, практически не меняя методик измерения искажений подложки [1-3].

Следует отметить, что для определения искажений подложки при осаждении на нее металла использовались методы тензометрии и рентгеноструктурного анализа. Однако подобные подходы, по-видимому, не получили широкого распространения.

В известных из литературы исследованиях не принималась во внимание форма области осаждения. Вместе с тем исследование особенностей, связанных, например, с угловыми точками позволяет более точно представить кинетику электрохимического процесса и отклик механической системы на него. В настоящей работе предпринята попытка восполнить этот пробел.

Теоретическая модель растущей по толщине пластины. Рассмотрим электролитическое осаждение не на линейку, а на одну из сторон жестко заземленной по контуру пластины, причем не на всю ее поверхность, а лишь на выделенную часть. В общем случае уравнение для прогиба w растущей пластины будет иметь вид [4]:

$$D \nabla^2 \nabla^2 w = q + (\lambda + 2\mu) \int_{-h_-}^{h_+} \left[\left(z - \frac{h_+ - h_-}{2} \right) \nabla^2 \varepsilon_m \right] dz + h p \nabla^2 w, \quad (1)$$

где h_+ и h_- расстояния от плоскости осреднения до лицевых поверхностей пластины, $h = h_+ + h_-$ - толщина пластины, D - цилиндрическая жесткость пластины, ε_m - несовместные локальные деформации, вызванные электрохимическим процессом, p - граничные усилия натяжения подложки, q - поперечная нагрузка, обусловленная гидростатическим давлением электролита.

Для круглой пластины, жестко заземленной на контуре, с круглой областью осаждения решение уравнения (1) может быть представлено в виде

$$w_0 = \frac{q}{D} \frac{\sqrt{\kappa} (a^2 - r^2) I_0(\sqrt{\kappa} a) + 2a \left[I_0(\sqrt{\kappa} r) - I_0(\sqrt{\kappa} a) \right]}{4 \kappa^{3/2} I_1(\sqrt{\kappa} a)}; \quad (2)$$

$$w = -\frac{M(\varepsilon_m)}{\kappa D} \left\{ I_0(\sqrt{\kappa} r) \left[\frac{2 - 2a\sqrt{\kappa} \left(I_0(\sqrt{\kappa} b) + b\sqrt{\kappa} I_1(\sqrt{\kappa} b) \right) K_1(\sqrt{\kappa} a)}{a\sqrt{\kappa} I_1(\sqrt{\kappa} a)} + \right. \right. \\ \left. \left. 2b\sqrt{\kappa} K_1(\sqrt{\kappa} b) - 2K_0(\sqrt{\kappa} b) \right] + \right. \\ \left. 2 \frac{\sqrt{\kappa} a \left(\ln\left(\frac{a}{b}\right) - 1 \right) I_1(\sqrt{\kappa} a) + \sqrt{\kappa} b I_1(\sqrt{\kappa} b) + I_0(\sqrt{\kappa} b) - I_0(\sqrt{\kappa} a)}{a\sqrt{\kappa} I_1(\sqrt{\kappa} a)} + \right. \\ \left. 2\theta(r-b) \left[1 + \ln\left(\frac{b}{r}\right) + \left(K_0(\sqrt{\kappa} b) - \sqrt{\kappa} b K_1(\sqrt{\kappa} b) \right) I_0(\sqrt{\kappa} r) - \right. \right. \\ \left. \left. \left(I_0(\sqrt{\kappa} b) + \sqrt{\kappa} b I_1(\sqrt{\kappa} b) \right) K_0(\sqrt{\kappa} r) \right] \right\}, \quad (3)$$

где w_0 - решение для равномерно распределенной нагрузки, I и K - функции Бесселя, $\kappa = \frac{h p}{D}$, M - момент, равномерно распределенными по границе области осаждения.

Предполагается, что $\varepsilon_m = E H(r-a)$, где a - радиус области осаждения, а H - функция Хевисайда. Параметры p и E идентифицируются экспериментально из условия наименьшего квадратичного отклонения теоретических и экспериментальных прогибов.

Экспериментальная установка. Электролитическая ячейка, в которой происходит осаждение, представляет собой полый цилиндр, одним основанием которого является жестко заземленная фланцевым соединением подложка-катод, а второе глухо закрыто, причем у закрытого основания находится пластина-анод. Схематическое изображение электролитической ячейки дано на рис. 1.

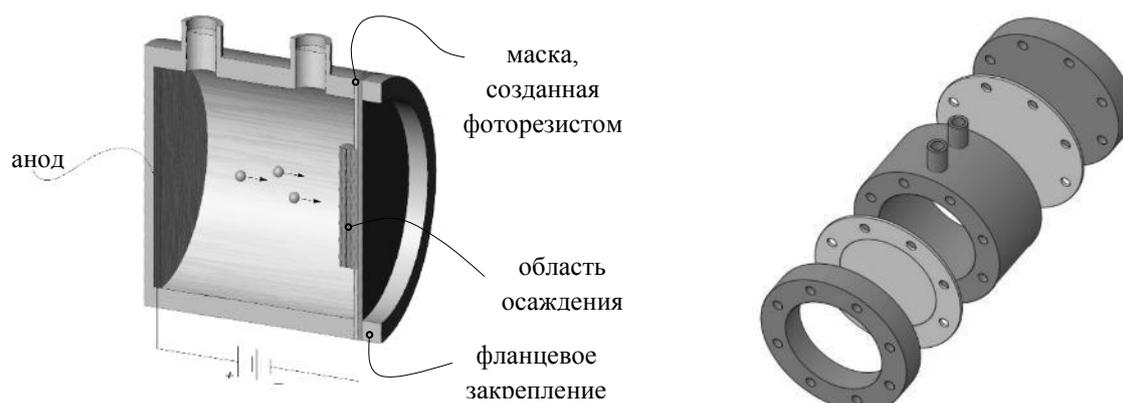


Рис. 1. Электролитическая ячейка.

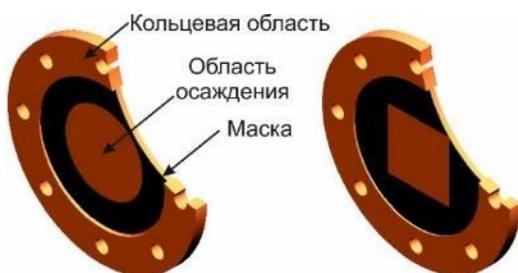


Рис. 2. Экспериментальные образцы.

Подложка представляет собой круглый диск из меди толщиной 0.3 мм, причем борт медного диска, который попадает в зону заземления, имеет толщину 0.5 мм для обеспечения граничных условий жесткой заделки. Диаметр пластины составляет 80 мм, плотность тока при осаждении 2 А/дм². Область осаждения на пластине выделялась с помощью изолирующей фоторезистивной маски. Эксперименты проводились с пластинами с круглой областью осаждения диаметром 50 мм и квадратной областью со стороной 40 мм. Схематическое изображение экспериментальных образцов дано на рис. 2. Искривления пластины во время роста фиксируется методом голографической интерферометрии в реальном времени.

Результаты. Для определения параметра p измеряется изгиб пластины без осажденного слоя при действии равномерно распределенной нагрузки q , соответствующей приращению столба жидкости, в данном случае электролита.

Идентификация p осуществляется из условия наименьшего квадратичного отклонения экспериментально определенных прогибов и значения прогибов из формулы (2). Затем производится осаждение меди в течении 90 минут. Толщина осадка, образовавшегося за это время составляет порядка 30 мкм. Каждые 2 минуты фиксировались голограммы с полем перемещений точек пластины. Примеры голограмм представлены на рис. 3.

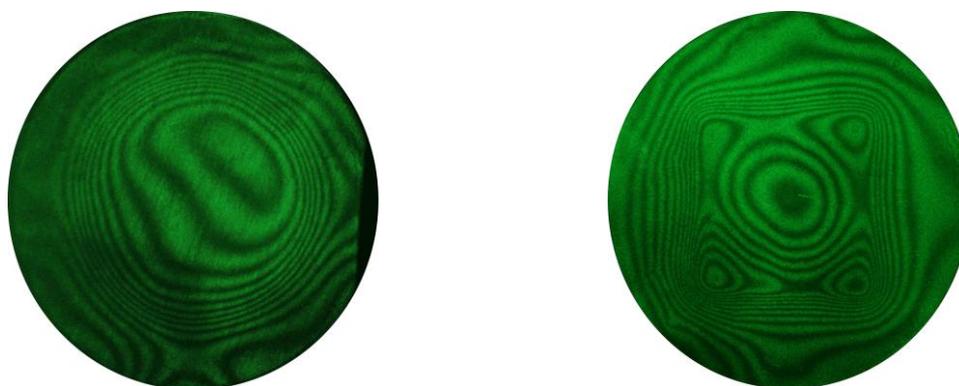


Рис. 3. Изолинии перемещений при осаждении металла на круглую и квадратную области круглой жестко заземленной пластины.

Далее, имея поле перемещений точек осаждаемой пластины, посредством формулы (3), становится возможным найти поле напряжений в подложке и осажденном слое.

Выводы. В работе предложен метод определения напряжения в изделии, состоящем из подложки и электролитического осадка, методом, который, являясь развитием идей Стони, позволяет получить распределение внутренних напряжений в изделии, в том числе учесть краевой эффект на границе осаждения.

Работа выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации АААА-А20-120011690132-4) и при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-03228.

Литература

1. Ваграмян А.Г., Петрова Ю.С. Физико-механические свойства электролитических осадков. – М.: Машиностроение, 1980. –211 с.
2. G. G. Stoney. The Tension of Metallic Films Deposited by Electrolysis // Proc. R Sot. London Ser. 1909. pp. 172-175.
3. Brenner A., Senderoff S. Calculation of Stress in Electrodeposits from the Curvature of a Plated Strip // J. Res. Natl. Bur. Stand. 1949. V.42 pp. 105 - 123.
4. Д.К. Бут, П.С. Бычков, С.А. Лычев. Теоретическое и экспериментальное исследование изгиба тонкой подложки при электролитическом осаждении // Вестник ПНИПУ. Механика. 2020, в печати.

МЕТОД ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ СОГЛАСОВАННОСТИ В ПРИЛОЖЕНИИ К РАСЧЁТУ ТЕЧЕНИЙ ГАЗА В УЗЛАХ КАНАЛОВ НА ОСНОВЕ ЗАКОНОВ СОХРАНЕНИЯ В ИНТЕГРАЛЬНОЙ ФОРМЕ

Вельмакин Г.С.

Научный руководитель — профессор, д.т.н. Дубравин Ю.А.

МАИ, Москва

grigoryyii@gmail.com

Реализован метод термодинамической согласованности на примере раздачи потока в веер каналов произвольной геометрии, решение сведено к замкнутой системе нелинейных алгебраических уравнений. Выполнен численный анализ и сопоставление с иными подходами и экспериментальными данными.

Ключевые слова: гидрогазодинамика, каналы, 2-е начало термодинамики, сильные разрывы, проблема незамкнутости.

Введение. Под узлами каналов понимаются участки каналов с локальными, конечными по величине воздействиями на поток газа. Здесь в виде скачка площади поперечного сечения канала, излом оси канала, подвод - отвод тепла. Моделирование подобных задач на основе законов сохранения в интегральной форме, вместе с необходимыми уравнениями состояния, приводит к незамкнутой системе алгебраических уравнений. Проблема незамкнутости, здесь, решается методом [1,2], основанном на факте независимости термодинамической функции - коэффициента восстановления давления - явно от геометрических аргументов, следующего из анализа первого и второго начал термодинамики. Подобная зависимость может проявляться лишь неявно – при учёте диссипативных потерь за счёт сил трения, или подвода тепла. С другой стороны, подобную функцию можно построить на основе связей между гидродинамическими параметрами, следующих из законов сохранения и, следовательно, содержащую зависимость от геометрических аргументов в виде величины скачка площади и угла излома оси. Отдавая предпочтение выводам термодинамики, в методе разработан математический аппарат, обеспечивающий получение необходимого числа дополнительных соотношений, замыкающих систему законов сохранения с доказанной единственностью решения задачи и обеспечивающей соблюдение законов сохранения и второго начала термодинамики.

Постановка задачи. В окрестности узла трёх каналов (рис. 1) выделяется объем сечениями каналов, в которых параметры потока можно считать однородными.

Параметры состояния газа в одном из каналов на входе в зону перестройки потока считаются известными и отмечаются индексом “1”, в двух других – искомыми, с индексами “2” и “3”. Законы сохранения в интегральной форме записываются для двух трубок тока, начинающихся во входном сечении канала и заканчивающихся в выходном сечении “своего” канала. Потoki пересекают общую зону перестройки с равными для обоих потоков

средними давлениями - $p_{\sigma i}$ на боковых поверхностях трубок тока, испытывают разворот потока на угол и изменение площади поперечного сечения от некоторой доли во входном сечении - $d_i S_1$ до площади выходного сечения - S_i , определяемых конструкцией узла. Предполагается, что: линейные размеры зоны перестройки потока в каждой трубке тока малы в сравнении с внешними участками соответствующих потоков, что позволяет считать зону перестройки потока сильным разрывом; или течение стационарное, а массовые эффекты незначительны.

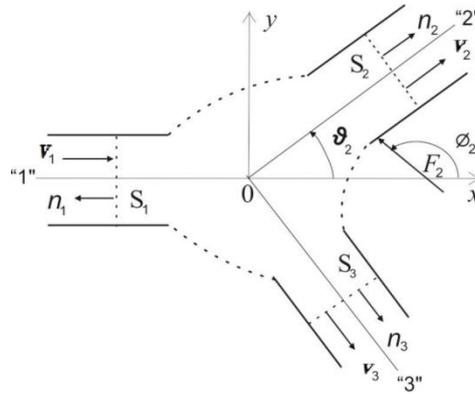


Рис.1.

Допускается подвод тепла извне через боковые поверхности и наличие сил трения на границах трубок тока. В итоге, система законов сохранения для трубок тока в терминах средних гидродинамических параметров [3], дополненная уравнениями состояния совершенного газа, принимают вид незамкнутой системы нелинейных алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned}
 1. (S\rho v)_i &= d_i (S\rho v)_1, \quad 2. (S\rho v H)_i - d_i (S\rho v H)_1 - d_i (Ga^2)_1 \Delta_{qi} = 0, \quad i = 2, 3; \\
 3. J_i \cos \vartheta_i - F_i \cos \phi_i - d_i J_1 &= 0, \quad 4. J_2 \sin \vartheta_2 - F_2 \sin \phi_2 = 0, \quad (J_3 \sin \vartheta_3 - F_3 \sin \phi_3) \cos \chi = 0 \quad (1) \\
 5. (J_3 \sin \vartheta_3 - F_3 \sin \phi_3) \sin \chi &= 0, \quad p = \rho RT, \quad u = p / \rho(\gamma - 1).
 \end{aligned}$$

Здесь: $H = \beta v^2 / 2 + p / \rho + u$, $G = S\rho v$, $d_i J_1 = d_i (\alpha S\rho v^2 + Sp)_1 - d_i (Gv)_1 \Delta_{ti}$,
 $J_i = (\alpha S\rho v^2 + Sp)_i - p_{\sigma i} (S_i - d_i S_1)$, a – скорость звука, $\Delta_{qi} = - \int_{\sigma_i} (q_n^* + \tau_n^* \cdot \mathbf{v}) ds / d_i (Ga^2)_1$,

$$\Delta_{ti} = - \int_{\sigma_i} \tau_{nx}^* ds / d_i (Gv)_1; \quad \alpha, \beta - \text{коэффициенты неравномерности поля скоростей в}$$

характерных сечениях потока, Δ_{qi}, Δ_{ti} – тепловое и сил трения воздействия. Для диадного узла в числе лишних неизвестных: доли трубок тока во входном сечении, средние давления на «скачке» площади каждой трубки тока и углы ориентации сил со стороны элементов конструкции, отклоняющих потоки в трубках тока от первоначального направления.

В таком виде система уравнений позволяет установить связи между параметрами состояния среды, не являющихся решением задачи и содержащая геометрические характеристики узла: углы ориентации названных сил и характеристики величины скачка площади поперечных сечений в каждой трубке тока:

$$\begin{aligned}
 1. \frac{v_i}{v_1} &= \frac{K_i \pm v N_i}{(n_i + 1) M_1^2}, \quad 2. \frac{\rho_i}{\rho_1} = \frac{(1 - \Delta_{si})(n_i + 1) M_1^2}{K_i \pm v N_i}, \quad 3. \frac{p_i}{p_1} = \frac{K_i \mp v n_i N_i}{I_i (n_i + 1)}, \quad i = 2, 3 \\
 4. \frac{T_i}{T_1} &= \frac{(K_i \mp v n_i N_i)(K_i \pm v N_i)}{I_i (1 - \Delta_{si})(n_i + 1)^2 M_1^2}, \quad 5. M_i^2 = (1 - \Delta_{si}) I_i \frac{K_i \pm v N_i}{K_i \mp v n_i N_i}, \quad 6. \frac{p_{\sigma i}}{p_1} = 1 + \varphi_{pi} \left(\frac{p_i}{p_1} - 1 \right). \quad (2)
 \end{aligned}$$

Здесь: $n_i = \frac{\gamma}{1 + (\gamma - 1)\varphi_{pi}\Delta_{si}}$, $I_i = \frac{(n_i - 1)}{(\gamma - 1)(1 - \Delta_{si})}$, $K_i = I_i + n_i M_1^2 (\alpha_1 - \Delta_{ti}) / A_i - n_i (A_i - 1) / \gamma A_i$,

$$N_i = \left\{ K_i^2 - 2 \frac{n_i^2 - 1}{\gamma - 1} M_1^2 \left(1 + \beta_1 \frac{\gamma - 1}{2} M_1^2 + (\gamma - 1) \Delta_{qi} \right) \right\}^{1/2}, \quad \nu = \text{sign}(M_1 - 1), \quad A_i = \frac{\sin(\phi_i - \mathcal{G}_i)}{\sin \phi_i}.$$

При отсутствии каких-либо воздействий на потоки и выборе верхнего знака соотношения (2) соответствуют непрерывным течениям, а нижнего – приводят к соотношениям Рэнкина - Гюгонио на прямом скачке уплотнения. При отличных от нуля воздействиях связи между параметрами состояния на границах узла имеют вид соотношений:

$$\psi_i / \psi_1 = \phi_i [X_i, \Delta_{si}, A_i, \varphi_{pi}(X_i, \Delta_{si}, A_i)], \quad X_i = \{x_{ij}\} = \{\Delta_{ci}, \Delta_{qi}\}, \quad \Delta_{si} = 1 - d_i / s_i, \quad s_i = S_i / S_1; \quad (3)$$

и допускают множество решений в силу неопределённости величин A_i , φ_{pi} и неизвестной зависимости последних от аргументов. Среди аргументов, впредь, различаются геометрические - Δ_{si} , A_i и физические - X_i ; последние ниже рассматриваются как внешние, задаваемые, параметры.

Реализация метода. Следуя методу [1,2], используя (2), строится функция, подобная коэффициенту восстановления давления, сохраняющая свойство функций (3)

$$f_i = \frac{p_{0i}}{p_{01}} = \frac{p_{0i}}{p_i} \frac{p_i}{p_1} \frac{p_1}{p_{01}} = \pi(M_1) \cdot \frac{K_i \mp \nu n_i N_i}{(n_i + 1) I_i} \cdot \left(1 + \frac{n_i - 1}{2} \frac{K_i \pm \nu N_i}{K_i \mp \nu n_i N_i} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}, \quad (4)$$

Согласно выводам термодинамики функция $f_{0i} = p_{0i} / p_{01}$ не должна зависеть от геометрических воздействий:

$$f_i - f_{0i} = 0, \quad \text{или} \quad df_i - df_{0i} = 0, \quad i = 2, 3 \quad (5)$$

$$\left[\frac{\partial f_{0i}}{\partial x_{ij}} - \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_{ij}} + \frac{\partial f_i}{\partial \varphi_{pi}} \frac{\partial \varphi_{pi}}{\partial x_{ij}} \right) \right] dx_{ij} - \left(\frac{\partial f_i}{\partial \Delta_{si}} + \frac{\partial f_i}{\partial \varphi_{pi}} \frac{\partial \varphi_{pi}}{\partial \Delta_{si}} \right) d\Delta_{si} - \left(\frac{\partial f_i}{\partial \mathcal{G}_i} + \frac{\partial f_i}{\partial A_i} \frac{\partial A_i}{\partial \mathcal{G}_i} + \frac{\partial f_i}{\partial \varphi_{pi}} \frac{\partial \varphi_{pi}}{\partial A_i} \frac{\partial A_i}{\partial \mathcal{G}_i} \right) d\mathcal{G}_i = 0.$$

Отсюда, вследствие независимости аргументов, следуют дифференциальные уравнения:

$$\frac{\partial A_i}{\partial \mathcal{G}_i} = - \frac{\partial f_i}{\partial \mathcal{G}_i} \left(\frac{\partial f_i}{\partial A_i} + \frac{\partial f_i}{\partial \varphi_{pi}} \frac{\partial \varphi_{pi}}{\partial A_i} \right)^{-1}, \quad A_i(\mathcal{G}_i = 0) = 1; \quad \frac{\partial \varphi_{pi}}{\partial \Delta_{si}} = - \frac{\partial f_i}{\partial \Delta_{si}} \left(\frac{\partial f_i}{\partial \varphi_{pi}} \right)^{-1}, \quad n_i(\Delta_{si} = 0) = \gamma.$$

$$\text{Первое, вследствие } \partial f_i / \partial \mathcal{G}_i = 0, \text{ имеет решением } A_i = \frac{\sin(\phi_i - \mathcal{G}_i)}{\sin \phi_i} = 1, \quad \text{tg} \phi_i = \frac{\sin \mathcal{G}_i}{\cos \mathcal{G}_i - 1}.$$

Решение второго, для одиночного канала с прямолинейной осью ($A_i = 1$), изучено в [1] и может быть заменено эквивалентным – алгебраическим – методом (5), где первая величина следует из (4) при $A_i = 1$, а вторая – из (4) - $f_{0i} = f_{0i}(X_i)$ при отсутствии всех геометрических аргументов. Применительно к рассматриваемой задаче, проблема определения неизвестных величин $\varphi_{pi}(\Delta_{si}, X_i)$, $d_i(\Delta_{si}, X_i)$ (при $A_i = 1$) сводится к решению системы уравнений

$$f_i(\Delta_{si}, X_i, \varphi_{pi}(\Delta_{si}, X_i)) - f_{0i}(X_i) = 0, \quad p_{\sigma 2}(\Delta_{s2}, X_2, \varphi_{p2}(\Delta_{s2}, X_2)) = p_{\sigma 3}(\Delta_{s3}, X_3, \varphi_{p3}(\Delta_{s3}, X_3)) \quad (6)$$

при очевидном условии $d_2 + d_3 = 1$.

Результаты. В работе выполнена серия расчётов для анализа и сравнения с подходами других авторов [4] в сопоставимых условиях (рис. 2, 3, 4).

Данные по рисунку 2 ($\zeta = 2\Delta_r$ - сила трения, “(+)” - признак наличия скачка уплотнения): 1. $\zeta = 0$, $\mathcal{G}_i = 0^\circ$. 2. $\zeta \neq 0$, $\mathcal{G}_i = 90^\circ$. 3. $\zeta \neq 0$, $\mathcal{G}_i = 90^\circ$, $\Delta_{qi} = +0,2$. 4. Эксперимент $\phi_p = 0,47(1 \pm 0,049)$ [1, 5]. 5. $\phi_p = 0,5$ - расчёт [1]. 6. $\zeta = 0$, $\mathcal{G}_i = 45^\circ$, (на графике $\Delta M = M - 2$). 7. $\zeta = 0$, $\mathcal{G}_i = 0^\circ$, (+). 8. $\zeta \neq 0$, $\mathcal{G}_i = 45^\circ$, (+). 9. $\zeta \neq 0$, $\mathcal{G}_i = 90^\circ$, $\Delta_{qi} = +0,2$, (+).

Данные по рисунку 3 и 4: 1. $\zeta = 0$, $\mathcal{G}_i = 0^\circ$. 2. $\zeta \neq 0$, $\mathcal{G}_i = 90^\circ$. 3. $\zeta \neq 0$, $\mathcal{G}_i = 90^\circ$, $\Delta_{q1} = -0,1$, $\Delta_{q2} = +0,1$. 4. $\zeta \neq 0$, $\mathcal{G}_i = 90^\circ$, $\Delta_{q1} = +0,1$, $\Delta_{q2} = -0,1$.

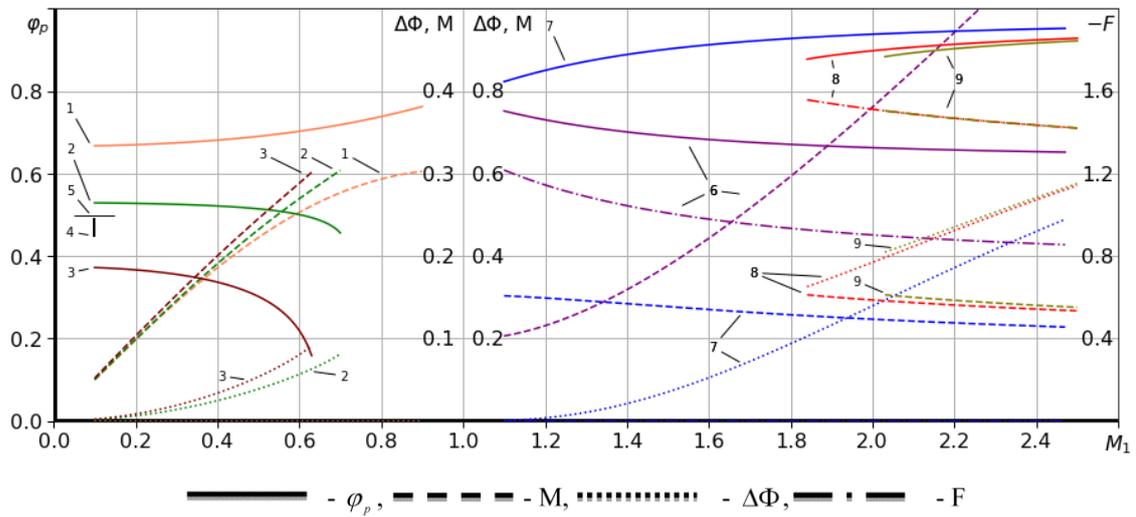


Рис. 2. Раздача потока в симметричные расширяющие каналы ($\Delta_{si} = 0.5$).

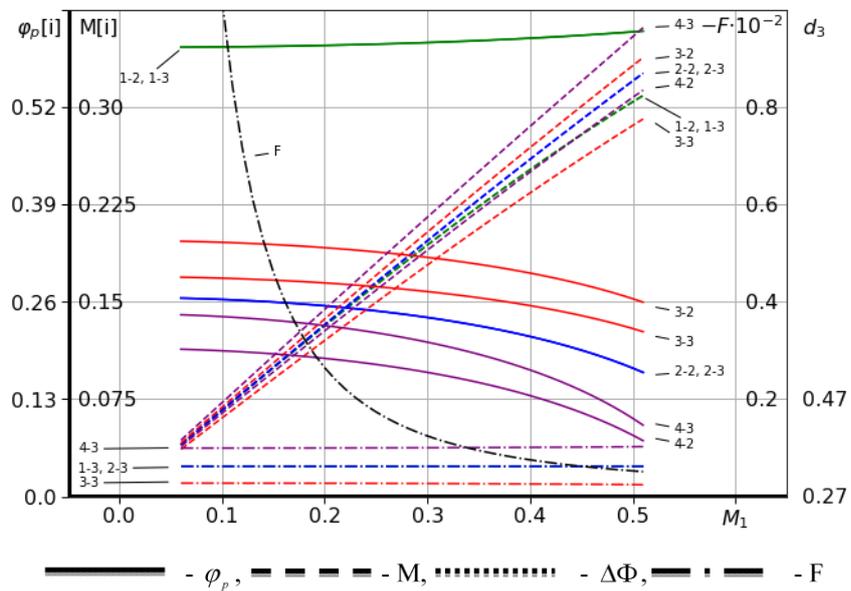


Рис.3. Асимметрия конструкции тепловых и сил трения воздействия ($\Delta_{si} > 0$).

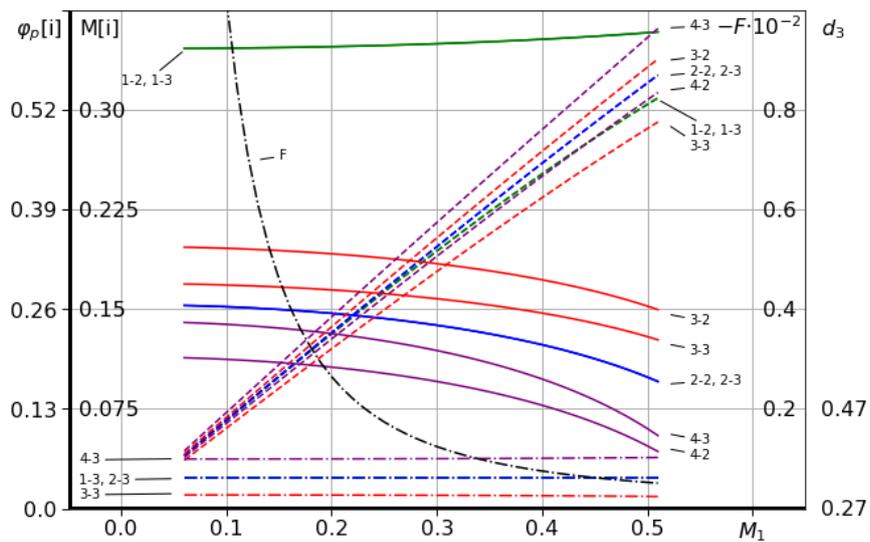


Рис.4. Асимметрия конструкции тепловых и сил трения воздействия ($\Delta_{si} < 0$).

Литература

1. Дубравин Ю.А. О связи гидродинамических параметров в зонах локальных воздействий на поток // ЖПМиТФ СО АН СССР. 1989. № 3. С. 60-69.
2. Дубравин Ю.А. Условия в узле одномерных течений газа // ПМиТФ СО РАН. 1995. Т. 36. № 4. С. 98-109.
3. Седов Л.И. Механика сплошных сред. Т. 1. М.: Наука, 1983. 528 с
4. Белов В.М. Параметрическое исследование решений и построение алгоритмов и программ расчета некоторых обобщенных задач о распаде произвольного разрыва: Дис. к. ф.-м. н. Томск, 2006.
5. Беклемишев Н. Н., Дубравин Ю. А. Прикладная гидрогазодинамика внутренних течений. Специальные задачи. М.: Изд-во МАИ, 2016.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЛЩИНЫ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДРОБЕСТРУЙНОЙ ОБРАБОТКЕ

Виндокуров Д.В.

Научный руководитель — доцент, д.т.н. Трофимов В.Н.

ПНИПУ, Пермь

vindokurovdenis@mail.ru

Для повышения физико-механических свойств поверхности ответственных деталей аэрокосмической техники, атомного и энергомашиностроения и др., и исключения их разрушения вследствие поверхностных дефектов, которые возникают в процессе их изготовления и эксплуатации широкое применение получили методы поверхностного пластического деформирования (ППД), в частности, методы дробеструйной обработки [1-3].

Актуальной характеристикой поверхностного слоя после ППД являются уровень остаточных напряжений и толщина упрочненного слоя.

При проектировании технологического процесса дробеструйной обработки, эффективность обработки удобно определять тестом, основанном на измерении прогиба стандартной измерительной пластины – пластины Альмена. Пластину Альмена, подвергнутую дробеструйной обработке, можно представить в виде биметаллической пластины, деформация которой определяется объемными изменениями пластически деформированного поверхностного слоя.

В работе рассмотрены известные решения, позволяющие определить напряжения в поверхностных слоях биметаллической пластины [1, 4-6].

Проведены экспериментальные исследования по ультразвуковой дробеструйной обработке (УЗДО) пластин Альмена из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Решена обратная задача определения толщины упрочненного слоя на основе результатов теста и результатов определения поверхностных остаточных напряжений с использованием рентгеновского метода. Полученные результаты использованы для разработки методики определения толщины упрочненного слоя.

Литература

1. Саверин М.М. Дробеструйная обработка. Теоретические основы и практика применения. М.: Машгиз, 1955, 312с.
2. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием. Справочник. М.: Машиностроение, 1987, 328с.
3. Кудрявцев, И.В. Повышение прочности и долговечности крупных тяжелых деталей машин поверхностным наклепом. М.: НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1970, 144с.
4. Тимошенко С.П. Устойчивость упругих систем. М.-Л., ОГИЗ-Гостехиздат, 1946, 532с.
5. Сироткина Н.М., Сироткина Н.С. Механика. Математика, 2002, Вып. 4, 222-225
6. Stoney G. Proc. R. Soc. Ser. A. London, 1909. Vol. 32. P. 172.

ДЕФОРМАЦИЯ ПРИ ВЫТЯЖКЕ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ В ЛЕНТЕ

Вилимок Я.А.

Научный руководитель — проф, д.т.н. Ларин С.Н.

ТулГУ, каф. МПФ, Тула

vilimokya@yahoo.com

Листовые детали сложной формы широко используются в машиностроительных областях, в том числе в авиационной промышленности. Изготовление таких деталей из

листа или ленты затруднено появлением надрывов в очагах деформации. Для предотвращения дефектов требуется оптимизация режимов деформирования.

Наибольшей производительности в производстве достигают благодаря использованию последовательной штамповки в ленте, так как это способствует изъятию ручного труда из технологического цикла. Такой процесс предполагает высокие требования к качеству изготовления инструмента и заготовок, к точной настройке механических и гидравлических прессов, соблюдение надежных режимов деформирования. Необходим также визуальный контроль за качеством деталей и надежностью работы технологического оборудования.

Разработана технология для изготовления ступенчатых колпачков в ленте из алюминия А5М, толщиной $t = 0,3 \dots 0,5$ мм. Габаритные размеры детали были выбраны следующие: наружный диаметр фланца $D = 13$ мм, высота детали $H = 3,2$ мм, высота первой и второй ступеней $h_1 = 1,7$ мм, $h_2 = 1,5$ мм диаметры ступеней $d_1 = 6,6$ мм и $d_2 = 3,8$ мм, высота $h_3 = 0,5$ мм, диаметр $d_3 = 1$ мм.

В связи с особенностью конфигурации и габаритных размеров детали была предложена следующая последовательность операций: пробивка отверстия, вытяжка первой ступени, вытяжка второй ступени, формовка выступов в противоположные стороны, калибровка, вырубка детали из полосы. Для данной детали был спроектирован и испытан штамповавтомат. Для этого был применен однорядный раскрой полосы. Коэффициент использования металла составил менее 60%. К основным характеристикам технологии относятся силовые параметры на всех операциях, включая определение центра давления штампа (перекос дополнительно влияет на появление обрывов), деформационные параметры, а также влияние допусков по толщине ленты на точность изготовления детали. На деформационные параметры сильно влияет качество инструмента: если в заготовке возникают заусенцы, то при вытяжке образуются обрывы. При отладке штампа возникали многочисленные трудности, главными из которых стали дефекты при первой и второй вытяжках, а также перекас ленты. Причиной этому послужило превышение предельной интенсивности деформации.

Для расчета значений предельной интенсивности деформаций использовался метод делительной сетки. Сетка наносилась на заготовку до ее формоизменения, и после вытяжки измерялись параметры ячеек вблизи очага деформации. Далее для каждой ячейки находились значения главных логарифмических деформаций, а затем вычислялись усредненные значения e_1 , e_2 , e_3 , зная которые можно определить интенсивность деформации.

Для каждого дефекта проводились испытания до его полного устранения. Количество заготовок для испытаний принималось в зависимости от необходимой степени достоверности результатов. При соблюдении требований ко всем технологическим параметрам были изготовлены бездефектные партии ступенчатых деталей.

Полученные опытные партии подтвердили реальность изготовления в ленте деталей выбранной конфигурации с требуемым качеством.

ПРОДОЛЬНЫЕ ВОЛНЫ ПОХГАММЕРА-КРИ, ДИСПЕРСИОННЫЕ УРАВНЕНИЯ И СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Гаджибеков Т.А.

Научный руководитель — профессор, д.ф-м.н. Кузнецов С.В.

МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва

90-region@mail.ru

Анализируются точные решения линейного уравнения Похгаммера-Кри для распространяющихся гармонических волн в цилиндрическом стержне. Проведен спектральный анализ матричного дисперсионного уравнения для продольных осесимметричных мод. Получены аналитические выражения для полей перемещения. Проанализировано изменение поляризации волн на свободной поверхности при изменении коэффициента Пуассона и круговой частоты. Замечено, что при фазовой скорости, совпадающей с поперечной объемной скоростью волн, все компоненты перемещений исчезают, это означает, что никакие продольные осесимметричные волны Похгаммера-Кри не могут распространяться с этой фазовой скоростью.

Введение. Уравнение для распространения гармонических волн в цилиндрическом стержне, также известное как уравнение Похгаммера-Кри, было впервые получено в [1 - 3]. Однако, решения этих уравнений, связывающие фазовую (или групповую) скорость с частотой

оставались практически неизученными вплоть до середины прошлого века, когда первые ветви дисперсионных кривых были получены численно в [4 - 13]. В [4 - 11] были исследованы продольные осесимметричные моды, а в [12, 13] - изгибные и крутильные моды. В соответствии с [9] аксиально-симметричные продольные моды обозначаются $L(0, m)$, где m - номер моды.

В [4 - 6] асимптотическими методами получены аналитические формулы как для коротковолнового ($c_{1,lim}$), так и для длинноволнового ($c_{2,lim}$) пределов фазовой скорости для нижней (фундаментальной) ветви продольных осесимметричных мод. Согласно [6] (см. также [8]), предельная скорость коротковолновой волны ($c_{1,lim}$) при $\omega \rightarrow \infty$

$$c_{1,lim} = c_R \quad (1)$$

совпадает со скоростью волны Рэля (c_R), а длинноволновой предел дал следующее значение фазовой скорости $c_{2,lim}$ [8]

$$c_{2,lim} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (2)$$

где E - модуль упругости и ρ - плотность материала. В [6, 15] длинноволновый предел $c_{2,lim}$ был назван «стержневой» скоростью волны.

Спектральный анализ матрицы \mathbf{A} . Дисперсионное уравнение Похгаммера-Кри имеет следующий вид

$$\det \mathbf{A} = 0, \quad (3)$$

где \mathbf{A} - квадратная матрица второго порядка с комплексными коэффициентами

$$A_{11} = -\left((q_1^2 + \gamma^2) \frac{c_1^2}{c_2^2} - 2\gamma^2 \right) J_0(q_1 R) + \frac{2q_1}{R} J_1(q_1 R), \quad A_{12} = -\frac{2i\gamma}{R} (q_2 R J_0(q_2 R) - J_1(q_2 R)), \quad (4)$$

$$A_{21} = -2i\gamma q_1 J_1(q_1 R), \quad A_{22} = -(q_2^2 - \gamma^2) J_1(q_2 R)$$

где c_1, c_2 - скорости продольной и поперечной объемных волн в среде,

$$q_1^2 = \left(\frac{c^2}{c_1^2} - 1 \right) \gamma^2, \quad \gamma = \frac{\omega}{c}. \quad (5)$$

Спектральный анализ матрицы \mathbf{A} разбивается на 2 случая.

1. Матрица \mathbf{A} простая (полупростая)

Это случай, когда матрица \mathbf{A} не содержит жордановых блоков и, следовательно, имеет два различных собственных вектора. Спектральное разложение дает

$$\vec{\alpha}_1 \leftrightarrow \lambda_1, \quad \vec{\alpha}_2 \leftrightarrow \lambda_2 \quad (6)$$

где λ_1, λ_2 - собственные числа матрицы \mathbf{A} , $\vec{\alpha}_1, \vec{\alpha}_2$ - двухмерные собственные вектора. Характеристическое уравнение для матрицы записывается в виде

$$\det(\mathbf{A} - \lambda \mathbf{I}) = 0, \quad (7)$$

где \mathbf{I} - единичная диагональная матрица, получаем следующее представление для собственных чисел

$$\lambda_{1,2} = s \pm d, \quad (8)$$

где

$$s = \frac{A_{11} + A_{22}}{2}, \quad d = \sqrt{f^2 + A_{12}A_{21}}, \quad f = \frac{A_{11} - A_{22}}{2}, \quad (9)$$

Отметим, что коэффициенты A_{ij} (9) определяются в (4).

Соответствующие (нормированные) собственные векторы имеют вид

$$\bar{\alpha}_{1,2} = \frac{1}{\sqrt{|A_{21}|^2 + |f \pm d|^2}} \begin{pmatrix} f \pm d \\ A_{21} \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Анализ выражений (8) и (10) позволяет сформулировать следующее.

Предложение 1. а) Необходимым и достаточным условием простоты матрицы является следующее условие для d , которое определяется в (9)

$$d \neq 0, \quad (11)$$

б) Условие вырождения матрицы \mathbf{A} принимает форму

$$A_{11}A_{22} = A_{12}A_{21}. \quad (12)$$

Доказательство. а) Выражение (8) показывает, что (11) дает необходимое и достаточное условие простоты рассматриваемой матрицы, поскольку при условии (11) оба собственных числа различны.

б) Согласно (8), условие вырождения принимает форму

$$s^2 = d^2, \quad (13)$$

поскольку при условии (13) одно из собственных значений обращается в нуль. Уравнение (13) с учетом (9) дает искомое уравнение (12).

Замечание 1. Непосредственный анализ показывает, что условие (12) эквивалентно дисперсионному уравнению (3).

2. Матрица \mathbf{A} неполупростая (содержит жорданов блок)

Условие непрототы матрицы \mathbf{A} , следующее из выражения (8), дает

$$d = 0. \quad (14)$$

С учетом (14) спектральное разложение матрицы \mathbf{A} имеет вид

$$\frac{1}{\sqrt{|A_{21}|^2 + |f|^2}} \begin{pmatrix} f \\ A_{21} \end{pmatrix} \leftrightarrow \lambda_{1,2} = s. \quad (15)$$

Таким образом, при (14) матрица \mathbf{A} становится не только непротой матрицей, но и неполупростой, поскольку имеет только один собственный вектор (15).

При (14) и с учетом (8) двойное вырождение матрицы \mathbf{A} эквивалентно

$$s = 0. \quad (16)$$

Теперь, с учетом (9), вытекает следующее предложение

Предложение 2. а) Необходимым и достаточным условием неполупростоты матрицы \mathbf{A} является

$$f^2 = -A_{12}A_{21}. \quad (17)$$

б) При условии (17) двойное вырождение матрицы \mathbf{A} принимает форму

$$A_{11} = -A_{22}. \quad (18)$$

Доказательство. а) Предложение 1. а) гарантирует, что при (14) матрица \mathbf{A} станет неполупростой, поскольку два ее собственных числа совпадают. Но, при условии (14) оба собственных вектора совпадают из-за выражений (10) для соответствующих собственных векторов, поэтому \mathbf{A} становится неполупростой. Тогда подстановка выражений (9) в (14) приводит к условию (17).

б) Из-за выражения (8), вырождение матрицы \mathbf{A} в (14) эквивалентно следующему условию

$$s = 0. \quad (19)$$

Но условие (19) эквивалентно (18).

Замечание 2. Для рассматриваемого случая вырождения неполупростой матрицы соответствующее дисперсионное уравнение принимает вид

$$(q_2^2 - \gamma^2)^2 (J_1(q_2 R))^2 - \gamma^2 q_1 q_2 J_0(q_2 R) J_1(q_1 R) + \frac{\gamma^2 q_1}{R} J_1(q_2 R) J_1(q_1 R) = 0. \quad (20)$$

Выводы. Проанализированы точные решения линейного уравнения Похгаммера-Кри для распространяющихся гармонических осесимметричных продольных волн $L(0, m)$ в цилиндрическом стержне. Был проведен спектральный анализ матричного дисперсионного уравнения для продольных осесимметричных мод ($L(0, m)$, $m > 0$) волн Похгаммера-Кри, который показал, что никакие продольные моды не могут распространяться с фазовой скоростью c_2 . Проанализировано изменение поляризации волны на свободной поверхности при изменении коэффициента Пуассона и круговой частоты. Было обнаружено, что существует фазовая скорость c_k (значение этой скорости зависит от коэффициента Пуассона), при которой продольная составляющая основной продольной моды U_z исчезает.

Литература

1. Pochhammer L 1876 Ueber die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten kleiner Schwingungen in einem unbegrenzten isotropen Kreiscylinder *J. Reine Angew. Math.* **81** 324–36
2. Chree C 1886 Longitudinal vibrations of a circular bar *Quart. J. Pure Appl. Math.* **21** 287–98
3. Chree C 1889 The equations of an isotropic elastic solid in polar and cylindrical coordinates, their solutions and applications. *Trans Cambridge Philos. Soc.* **14** 250–309
4. Field G S 1931 Velocity of sound in cylindrical rods *Canadian J. Research* **5** 619–24
5. Field G S 1934 Longitudinal waves in cylinders of liquid, in hollow tubes and in solid rods *Canadian J. Research* **11** 254–63
6. Field G S 1940 Dispersion of supersonic waves in cylindrical rods *Phys. Rev.* **57** 1188
7. Shear S K and Focke A B 1940 The dispersion of supersonic waves in cylindrical rods of polycrystalline silver, nickel, and magnesium *Phys. Rev.* **57** 532–37
8. Onoe M, McNiven H D and Mindlin R D 1962 Dispersion of axially symmetric waves in elastic rods *Trans. ASME. J. Appl. Mech.* **29** 729–34
9. Meeker T R and Meitzler A H 1964 *Guided wave propagation in elongated cylinders and plates* In: Physical acoustics. Principles and methods. Acad. Press. N.Y., vol. 1A., pp. 111–67
10. Kolsky H 1964 Stress waves in solids *J. Sound Vibr.* **1** 88–110
11. Kuznetsov S V 2002 Subsonic Lamb waves in anisotropic plates *Quart. Appl. Math.* **60** 577–87
12. Djeran-Maigre I and Kuznetsov S V 2005 Surface waves on a half-space with cubic symmetry *Int. J. Comp. Civil & Struct. Eng.* **2** 21–7
13. Djeran-Maigre I and Kuznetsov S V 2014 Velocities, dispersion, and energy of SH-waves in anisotropic laminated plates *Acoustical Physics* **60** 200–7

РЕЛАКСАЦИЯ ДИФФУЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ИЗГИБЕ БАЛКИ ТИМОШЕНКО

Гафуров У.С.

Научный руководитель — доцент, д.ф.-м.н. Земсков А.В.

МАИ, Москва

for.illusion@yandex.ru

Балки являются одним из наиболее распространённых конструктивных элементов в машиностроении. В основном они направлены на сопротивление изгибающим нагрузкам и часто являются наиболее ответственными элементами в конструкции. Нередко балки оказываются под комплексным воздействием не только механических силовых внешних фактов, но и диффузионных, из-за чего может произойти перераспределение легирующих или других элементов в балке и привести к её преждевременному ослаблению. Механодиффузионные эффекты экспериментально были открыты ещё в 30-е годы прошлого века. Первые математические модели построены около 3-х десятилетий спустя.

В данной работе рассматривается задача о плоских нестационарных поперечных колебаниях балки Тимошенко с эффектами массопереноса. Балка находится под действием изгибающих моментов, которые приложены к ее концам. Также на концах балки заданы плотности диффузионных потоков.

Для постановки задачи используется модель связанной упругой диффузии для N-компонентной сплошной среды в прямоугольной декартовой системе координат. Закон массопереноса записан с помощью обобщённого закона Фика, который учитывает конечные скорости распространения диффузионных возмущений в среде. Используя вариационный принцип Лагранжа – Даламбера, а также вводя ряд дополнительных допущений, из общей модели упругодиффузионной среды получена модель изгиба балки с учётом диффузии, которая состоит из связанной системы уравнений изгиба балки Тимошенко и N уравнений обобщённого массопереноса. Начальные условия полагаются нулевыми. Решение задачи ищется с помощью преобразования Лапласа и рядов Фурье в виде функций Грина. Так же приведён анализ учёта времени релаксации.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КРАЕВЫХ ДИСЛОКАЦИЙ И МИКРОПОР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

Герасимов Р.М.

Научный руководитель — доцент, к.ф.-м.н. Волегов П.С.

ПНИПУ, Пермь

romagrizly@gmail.com

Создание принципиально новых и совершенствование существующих методов обработки материалов, являющихся металлами или их сплавами, ставят перед исследователями в области механики твёрдого деформирования серьёзные вызовы ввиду отсутствия универсальной теории, способной точно объяснить всевозможные эффекты и явления, наблюдаемые в ходе различных технологических процессов. Наиболее значимым фактором, затрудняющим разработку математических моделей для описания поведения металлических материалов, является большое число механизмов зарождения, эволюции дефектов различных типов [1, 2]. Так процесс разрушения материала начинает происходить с уровня атомарных масштабов, а одним из носителей микроповрежденности принято считать микротрещины, зарождение которых в литературе чаще связывают со скоплением дислокаций и дислокационных структур на барьерах. Такого рода барьерами могут выступать микропоры, которые создают большие поля напряжений и являются стоками точечных, линейных дефектов (в том числе – дислокаций), а также дефектных структур иных типов.

В связи с необходимостью дополнительного исследования механизмов зарождения и развития микроповреждений на атомарном уровне в работе разработана и численно реализована математическая модель для описания взаимодействия микропор и дислокаций с использованием метода молекулярной динамики (МД). Основная идея МД заключается в представлении исследуемого материала в виде совокупности частиц (атомов), взаимодействующих друг с другом по законам классической механики. В качестве модели взаимодействия используется потенциал погруженного атома (EAM), что обусловлено его прозрачным с точки зрения физики алгоритмом построения, а также хорошей согласованностью с результатами натуральных экспериментов [3].

Начальная конфигурация расчетной области представляет собой ОЦК систему Fe-C с содержанием углерода 0.8%, соответствующим высокоуглеродистой стали, с параметром решетки 2.855 Å и размерами расчётной области 30x20x30 частиц по осям X, Y, Z. Температура поддерживается постоянной $T = 300$ К. Генерация микропоры происходит путем удаления частиц внутри сферической области, радиусом 6 Å. Размер устойчивых микропор и более подробное описание и обоснование алгоритма генерации микропоры рассмотрено ранее в статье [4]. Для внесения дислокации в МД систему используется решение изотропной теории упругости [5].

В начальный момент времени микропора, и дислокация находились друг относительно друга на расстоянии 6.5 Å и не взаимодействовали. Для инициации взаимодействия производилось деформирование по направлению OX, что советовало растяжению расчётной области с 85.65 Å до 93.144 Å (8.75 % относительной деформации) за 100000 шагов интегрирования с шагом интегрирования 1 фс. В ходе процесса деформирования ядро краевой дислокации начало притягиваться к микропоре, однако после контакта ядра и

микропоры взаимодействие прекратилось вплоть до конца численного эксперимента. С использованием параметра общего соседства [6] и алгоритма выделения дислокации [7] показано, что микропора является стоком примесных атомов в системе Fe-C. Стоит отметить, что перемещение примесных атомов к поверхности микропоры происходит за счет туннельного механизма, то есть вдоль краевой дислокации.

Литература

1. Контратьев Н.С., Трусов П.В. Описание упрочнения систем дислокационного скольжения за счет границ кристаллитов в поликристаллическом агрегате // Вестник ПНИПУ. Механика. - 2012. - Т. 1, No 3. - С. 78-97.
2. Ejaz A., Tanvir M., Kanwar L.A., Akhter J.I. Effect of Microvoid Formation on the Tensile Properties of Dual-Phase Steel // Journal of Materials Engineering and Performance. - 2000. - V. 9. - pp. 306–310.
3. Daw M.S., Baskes M.I. Embedded-atom method: Derivation and application to impurities, surfaces, and other defects in metals // Physical Review B. — 1984. — Vol. 29, Is. 12 – pp. 6443 – 6453.
4. Gerasimov R.M., Volegov P.S. Modeling of microvoids as a mechanism of microdamages: MD simulations // AIP Conference Proceedings. - 2018. - V. 2051. – 020096.
5. Hirth J., Lothe J. Theory of Dislocations, second ed., McGraw-Hill Publ. Co., New York, 1982, p. 78
6. Tsuzuki H., Branicio P., Rino J. P. Structural characterization of deformed crystals by analysis of common atomic neighborhood // Computer Physics Communications. – 2007. – Vol. 177, Is. 5 – pp. 518 – 523.
7. Stukowski A., Albe K. Extracting dislocations and non-dislocation crystal defects from atomistic simulation data // Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering. – 2010. – Vol. 18, Is. 8. – 085001.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТЕЙ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ ПОЛИМЕРНОГО БАЗИСА СЪЕМНОГО ПРОТЕЗА ПРИ ЖЕВАТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКЕ

Гета О.А.

Научный руководитель — к.т.н. Никитин А.Д.
МАИ, Москва
geta_olga2000@mail.ru

С развитием современных вычислительных методов и подходов наблюдается активное внедрение методов 3D проектирования стоматологических изделий в медицинскую практику. В частности, становится возможным переход к более персонализированному подходу в медицине. Это позволяет оказывать более качественные услуги и существенно повысить эффективность оказываемой помощи. Тем не менее, использование высокотехнологических инструментов без знания основных принципов биомеханического поведения стоматологических изделий может приводить к ошибкам. Так, например, для людей с неправильным прикусом, персонализированное решение может приводить к изготовлению базиса, разрушение которого наступает значительно раньше, чем даже классический подход, основанный на эмпирическом опыте.

Таким образом, возникает необходимость в исследовании полей напряжений, возникающих в базисе съемного протеза при жевательной нагрузке в зависимости от геометрических особенностей изделия. В настоящей работе рассматривается модельная постановка задачи, в которой базис моделируется как оболочка, опертая на упругое основание. Предполагается, что податливость этого упругого основания не однородна и в отдельных участках может существенно падать. В качестве рабочей гипотезы принимается следующая: в области сращения небных костей (область турса) податливость на порядок меньше значений характерных для всей остальной слизистой. Таким образом, при жевательной нагрузке, реакция базиса обусловлена распределенным давлением, возникающего в пятне контакта турса со сводом базиса. Задача решается в упругой постановке последовательным приложением внешних нагрузок в различных жевательных отделах: область резцов, клыков, моляров и премоляров. Напряженно деформированное состояние оценивается по критерию эквивалентных напряжений (по Мизесу).

Показано, что критическими нагрузками на базис являются усилия, связанные с откусыванием (нагрузка на резцы). Локализация максимальных значений напряжений обусловлена геометрическими особенностями протеза – технологическими нишами под тяжи. Проведен анализ влияния радиуса кривизны ниши под тяжи на максимальное значение напряжений. Даны качественные рекомендации по обеспечению продолжительного срока службы протеза.

ПРЯМОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИСЛОКАЦИОННЫХ СКОПЛЕНИЙ В МОНОКРИСТАЛЛЕ АЛЮМИНИЯ

Давлятшин Р.П., Волегов П.С.

Научный руководитель — доцент, к.ф.-м.н.

ПНИПУ, Пермь

romadavly@gmail.com

В рамках работы предложен и реализован алгоритм модельного внесения краевых дислокаций в монокристалл алюминия в процессе деформирования для изучения эволюции дислокационного скопления. Внесение дислокации в монокристалл происходит путем внедрения дополнительной атомарной полуплоскости и смещения атомов вокруг ядра дислокации по заданному полю напряжения дислокаций в предположении изотропной упругой среды. Для моделирования процесса деформирования применен метод молекулярной динамики (МД) и метод сопряженного градиента (СГ), взаимодействие между атомами описывается с помощью потенциала погруженного атома (ЕАМ). Анализ дефектной структуры монокристалла производится с применением алгоритма выделения дислокаций (DXA). В работе проведено моделирование эволюции дислокационного скопления методом молекулярной динамики и молекулярной статике, показана принципиальная возможность моделирования больших скоплений дислокаций с целью моделирования механизма зарождения микротрещин.

Введение. В настоящее время остро стоит задача создания металлических изделий и конструкций с повышенными эксплуатационными характеристиками. Для этого необходимо детально исследовать процессы, протекающие в металлах и сплавах вплоть до момента их разрушения. Основным механизмом разрушения, в свою очередь, является образование и рост микротрещин. Последние могут образовываться из-за скопления большого количества дислокаций (от 100 шт.) на одной системе скольжения около какого-либо препятствия [1]. Такие процессы практически невозможно наблюдать в натурном эксперименте, поэтому актуальным представляется использование различных техник прямого моделирования указанных процессов, в том числе – метода молекулярной динамики.

Методы. Целью работы является разработка и численная реализация алгоритма модельного внесения дислокаций в монокристалл алюминия в процессе деформирования, а также изучение особенностей эволюции дислокационного скопления. Алгоритм внесения одиночных дислокаций был предложен в работе [2]. Внесение дислокации в монокристалл происходит путем внедрения дополнительной атомарной полуплоскости и смещения атомов вокруг ядра дислокации. Эти смещения зависят от поля напряжения дислокации, которое определяется по упругим свойствам материала и вектору Бюргерса \mathbf{b} дислокации. Моделирование процесса деформирования монокристалла проводится с помощью метода молекулярной динамики и метода сопряженных градиентов. Взаимодействие между частицами задается с применением межатомного потенциала, основанного на методе погруженного атома (ЕАМ). В работе использован потенциал для алюминия, предложенный в [3]. Подробно структура МД моделей и ЕАМ потенциалов приведена в статьях [4, 5].

Модель и результаты. Разработанный алгоритм искусственного внесения дислокаций состоит из следующих шагов: 1) генерация идеального монокристалла, 2) выбор плоскости залегания, вектора Бюргерса \mathbf{b} дислокации, максимального количества краевых дислокаций на системе скольжения и местоположения дислокаций, 3) выбор моды, «скорости» и вида деформирования, 4) через каждое заданное количество шагов деформирования происходит подмена текущей конфигурации атомов на конфигурацию с дополнительной дислокацией на выбранной системе скольжения, 5) анализ дислокационной структуры монокристалла [6]. В молекулярной динамике деформирование различного рода реализуются следующим образом: выделяются жесткие границы по краям моделируемой области, взаимное расположение атомов в которых не меняется с течением времени, далее атомам из жестких границ задается постоянная скорость, соответствующая выбранному типу деформирования. В работе используется два вида деформирования: динамическое и квазистатическое. Динамическое деформирование происходит при заданной температуре с применением метода молекулярной динамики, а для проведения квазистатического деформирования используется метод сопряженных градиентов, т.е. при сдвиге жестких областей друг относительно друга на заданную величину происходит минимизация потенциальной энергии системы.

Для верификации разработанного алгоритма проведено четыре серии численных экспериментов. Сначала была изучена способность разработанной модели описывать

движение дислокации по системе скольжения в монокристалле алюминия при квазистатическом и динамическом деформировании простым сдвигом. Моделируемая система состояла из 145 тысяч атомов и имела размеры $172.63 \text{ \AA} * 143.53 \text{ \AA} * 99.11 \text{ \AA}$ по осям x , y и z соответственно. По осям x и y были выбраны конечные граничные условия, по оси z – периодические. Температура системы при динамическом деформировании равнялась 300 К. Выявлено, что краевые дислокации трансформируются в расщепленные и свободно перемещаются по своей системе скольжения в положительном направлении оси Ox (рис. 1).

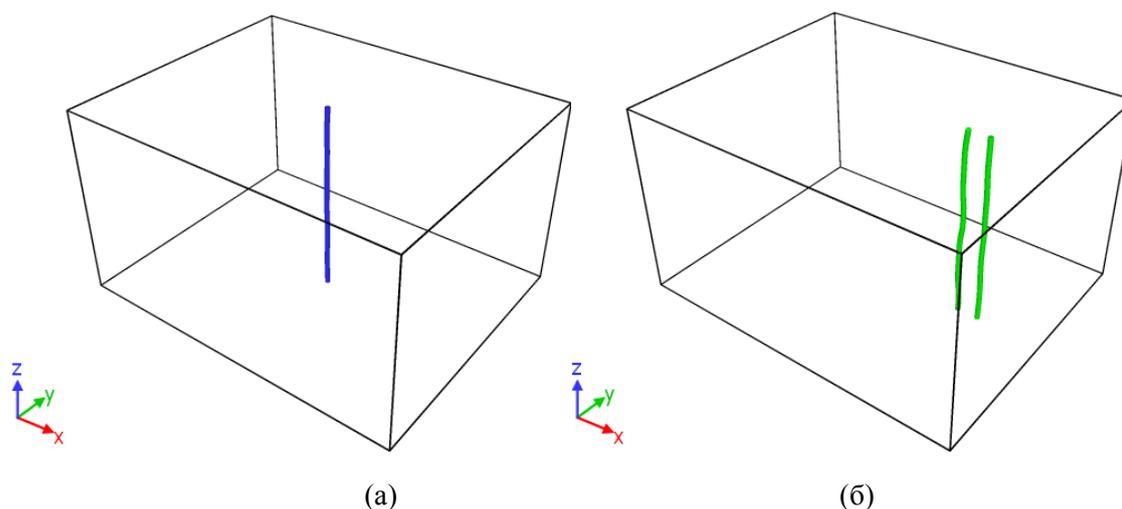


Рис. 1. Визуализация расчетной области с выделенными краевыми (а) и расщепленными (б) дислокационными линиями в начальный (слева) и конечный момент времени (справа)

В следующих численных экспериментах размеры системы по оси Ox были увеличены в три раза и количество дислокаций в плоскости скольжения увеличено до 8. В квазистатическом деформировании наблюдалось скопление дислокаций в одной плоскости скольжения. При увеличении количества дислокаций в дислокационном скоплении до пяти, происходит трансформация дислокаций в краевые (рис. 2).

При динамическом моделировании наблюдалось переползание некоторых дислокаций в соседнюю систему скольжения (рис. 3). Это можно объяснить тем, что при повышенных температурах возможность неконсервативного движения дислокаций увеличивается.

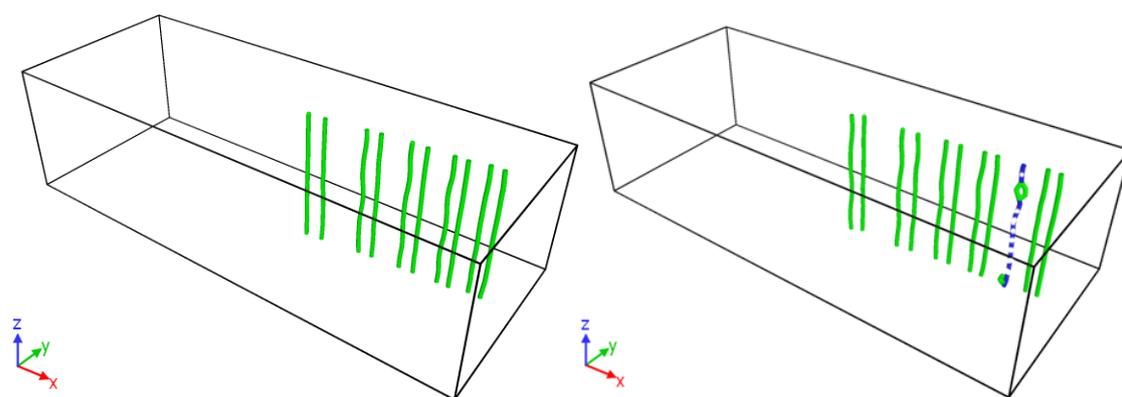


Рис. 2. Визуализация расчетной области с выделенными краевыми (пунктирная линия) и расщепленными (сплошная линия) дислокационными линиями до (слева) и после (справа) внесения шестой дислокации.

Таким образом, в работе предложен и численно реализован алгоритм модельного внесения дислокаций в монокристалл алюминия в процессе деформирования, проведено моделирование эволюции дислокационного скопления методом молекулярной динамики и

молекулярной статике, показана принципиальная возможность моделирования больших скоплений дислокаций с целью моделирования механизма зарождения микротрещин.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 17-19-01292).

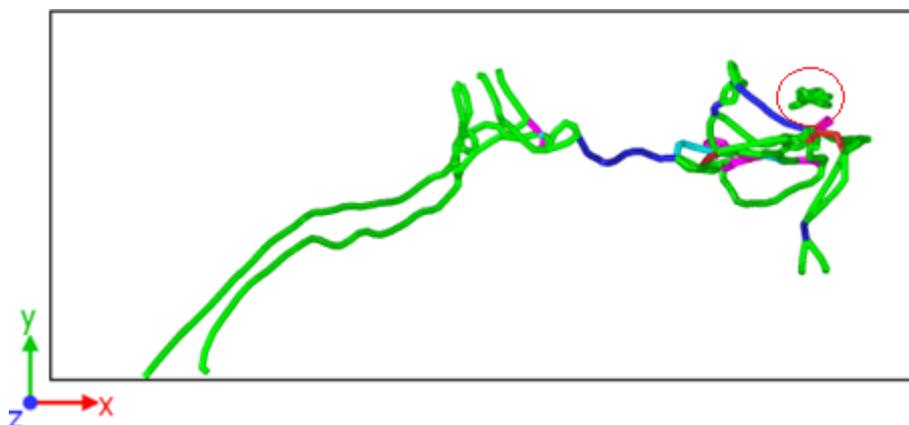


Рис. 3. Визуализация дислокационной структуры системы при динамическом деформировании с выделенной дислокацией на соседней системе скольжения

Литература

1. Stroh A. N. The formation of cracks as a result of plastic flow // Proc. R. Soc. London Ser. – 1954. – A. 223. – pp. 404-414.
2. Hirel P. Atomsk: A tool for manipulating and converting atomic datafiles // Comput. Phys. Commun. – 2015. – Vol. 197. – pp. 212-219.
3. Mishin Y., Farkas D., Mehl M. J., Papaconstantopoulos D. A. Interatomic potentials for monoatomic metals from experimental data and ab initio calculations // Phys. Rev. B. – 1999. – V. 59, No. 2. – pp. 3393-3407.
4. Волегов П.С., Герасимов Р.М., Давлятшин Р.П. Модели молекулярной динамики: обзор ЕАМ-потенциалов. Часть 1: Потенциалы для однокомпонентных систем // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2017. – № 4. – С. 214–237.
5. Волегов П.С., Герасимов Р.М., Давлятшин Р.П. Модели молекулярной динамики: обзор ЕАМ-потенциалов. Часть 2: Потенциалы для многокомпонентных систем // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2018. – № 2. – С. 114–132.
6. Stukowski A., Bulatov V. V., Arsenlis A. Automated identification and indexing of dislocations in crystal interfaces // Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. – 2012. – Vol. 20, No. 8. – 085007.

ПРИКЛАДНЫЕ НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ЗАДАЧИ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ОГРАНИЧЕННЫХ УПРУГИХ СПЛОШНЫХ СРЕДАХ

Давыдов С.А.

Научный руководитель — доцент, д.ф.-м.н. Земсков А.В.

МАИ, Москва

xenon_93@inbox.ru

Появлению новых технологических решений и способов обработки конструкционных материалов часто предшествует выход на новый уровень способов моделирования эффектов взаимодействия механических и физических полей. Это взаимодействие может быть описано как на микро-, так и на макроуровне. Примером такого взаимодействия на макроуровне может служить модель термоупругой диффузии, которая учитывает связанность напряжённо-деформированного состояния, температуры и концентрации вещества сплошной среды. Модель включает уравнения движения сплошной упругой среды, а также законы массо- и теплопереноса.

Законы переноса входят в модель как обобщённые законы Фика и Фурье. Обобщённые законы обладают большим интересом, т.к. позволяют описать в т.ч. и быстропротекающие процессы. Такого рода процессы могут возникать в упругих сплошных средах при моделировании технологий типа сварки взрывом или импульсной лазерной обработки. В этом случае рассматриваются ненулевые времена релаксации, а скорости распространения диффузионных и тепловых возмущений считаются ограниченными.

Помимо быстропротекающих процессов, решение задач термоупругой диффузии могут применяться при моделировании процессов цементации сталей, металлизации, наращивании тонких плёнок и т.д.

В данной работе рассматривается одномерная нестационарная задача термоупругой диффузии для изотропного многокомпонентного слоя. Используется локально-равновесная модель связанной термоупругой диффузии, включающая уравнения движения упругой среды, теплопереноса и массопереноса. Твёрдый раствор считается неидеальным. Все возмущения распространяются с конечными скоростями, а также учитывается перекрёстный диффузионный эффект, что важно для различных интерметаллидов. Начальные условия приняты нулевыми. Сложность решения указанных выше задач связана с процедурой преобразования Лапласа и его последующим обращением, которая в свою очередь зависит от вида граничных условий. Однако подбор вида специальных граничных условий позволяет получить численно аналитическое решение в виде рядов Фурье.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАРОЖДЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ТРЕЩИНЫ В ПОРИСТОМ АЛЮМИНИЕВОМ СПЛАВЕ С КВАДРАТНЫМ ХАРАКТЕРОМ РАСПОЛОЖЕНИЯ ПОР

Данилушкин В.С., Ледяев М.Е.

Самарский университет
vladislavdan@bk.ru

В данной работе рассмотрено конечно-элементное моделирование процесса зарождения и развития трещины в модели структуры пористого материала с квадратным расположением пор и модели материала с изотропной структурой. В результате компьютерного моделирования были получены характер распределения напряжений деформаций, траектории распространения трещин в вышеуказанных моделях. Проведен сравнительный анализ траектории распространения трещин в данных моделях, а также подтверждено, что пора способна выполнять роль стопа распространения трещины.

Введение. На сегодняшний день авиационная и космическая промышленность требуют создания новых прочных, в тоже время легких, материалов. Мы считаем, что пористые материалы способны конкурировать с современными композиционными материалами и алюминиевыми сплавами, которые применяются в промышленности. Для того чтобы достичь максимальных прочностных характеристик материала и обеспечить снижение массы, поры необходимо располагать в определенном порядке. За счет нулевой плотности поры относительно основного материала, возможно достичь снижения удельного веса всего материала, при этом, пора может играть роль упрочняющей фазы и способна тормозить разрушение. В связи с тем, что пора является не только упрочняющей фазой, но и концентратором напряжений, процесс разрушения заметно отличается от процесса разрушения компактного материала. Поэтому, целью данной работы является исследовать процесс зарождения и развития трещины в пористой структуре с квадратным характером расположения пор методом конечно-элементного анализа.

Методы. Для достижения поставленной цели, были построены две модели образцов: пористая структура с квадратным расположением пор с конфигурацией 3x3 (рисунок 1) и изотропная структура с концентратором напряжений в виде надреза в нижней и верхней части модели по её центру (рисунок 2). Концентраторы напряжений вводились с целью определения места разрушения модели изотропного образца. Конечно-элементное моделирование проводилось при помощи программного продукта MSC.Nastran с применением авторской программы-приложения (макроста), которая позволяет рассчитывать траекторию продвижения трещины на основе двух основных принципов: разрушение происходит в том месте, в котором возникают максимальные напряжения равные пределу прочности и работы, которая необходима на продвижение трещины.

Конечно-элементной модели были заданы свойства алюминиевого сплава АД1 в нагартованном состоянии. Основным допущением является то, что материал абсолютно упругий. Данные модели подвергались одноосному растяжению с деформацией равной 0.06%. Конечно-элементное моделирование проводилось в 20 шагов.

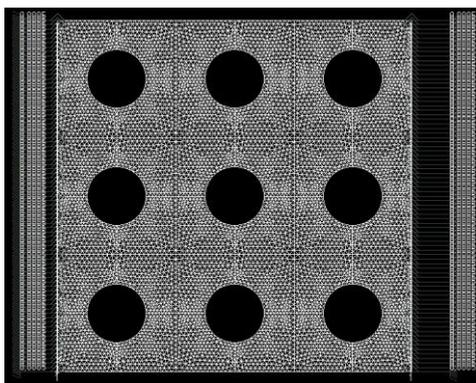


Рис.1. Конечно – элементная модель образца с квадратным расположением пор.

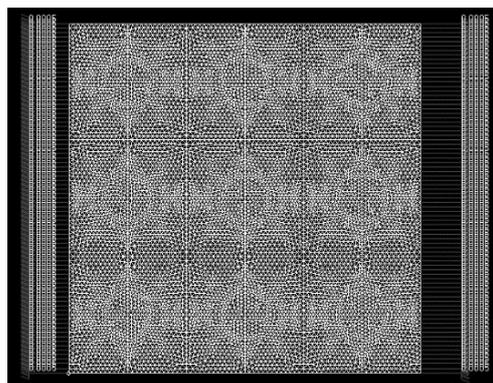


Рис.2. Конечно – элементная модель изотропного образца.

В результате компьютерного моделирования были получены эпюры распределения напряжений из которых видно, что в пористой структуре с квадратным расположением пор, наибольшие значения напряжений возникли на внешних полюсах крайних пор перпендикулярно оси растяжения. В модели с изотропной структурой наибольшие напряжения образовались в вершине концентратора напряжений. По итогам первых десяти шагов анализа в пористой структуре наблюдался равномерный рост трещины в сторону края модели перпендикулярно оси растяжения (рисунок 3), а в изотропной структуре трещина двигалась магистрально к центру модели (рисунок 4).

С 10 по 20 шаг решения трещина в модели образца с пористой структурой прошла от одного края до другого (рисунок 5), разделив образец на несколько частей. Важным является то, что трещина, прорвав пору к поверхности модели, перераспределила напряжения следующим образом. Уровень напряжений повысился на внутренних полюсах верхнего и нижнего ряда пор, при этом, в центральном ряде пор повышение уровня напряжений произошло на обоих полюсах, расположенных перпендикулярно относительно оси растяжения, что привело к зарождению новых 12 трещин. В тоже время, в модели с изотропной структурой, трещина продолжила развиваться магистрально (рисунок 6).

В результате проведенного компьютерного моделирования, был построен график зависимости условной длины трещины от относительной деформации, который показывает, что для продвижения трещины в модели с пористой структурой на 11 шаге требуется приращение деформации на 0.01%, а из графика для модели с изотропной структурой видно, что разрушение модели происходит при одной степени деформации (рисунок 7).

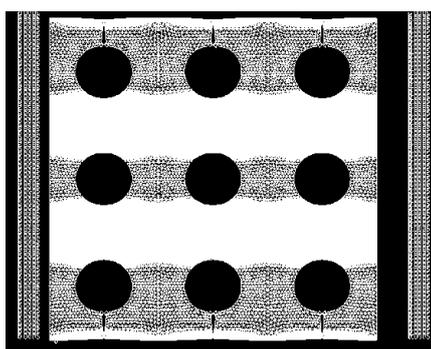


Рис.3. Карта распределения напряжений и деформаций в структуре с квадратным характером расположения пор на 10 шаге решения.

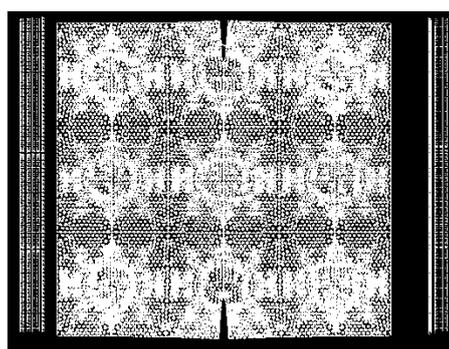


Рис.4. Карта распределения напряжений и деформаций в изотропной структуре на 10 шаге.

Это связано с тем, что радиус головы трещины, по достижению края модели, стал соизмерим с радиусом поры. Полученные результаты подтверждают, что пора способна выполнить роль стопора для распространения трещины.

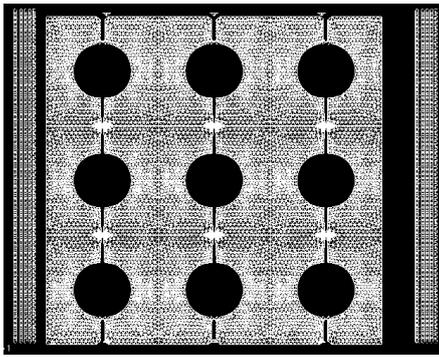


Рис.3. Карта распределения напряжений и деформаций в структуре с квадратным характером расположения пор на 10 шаге решения.

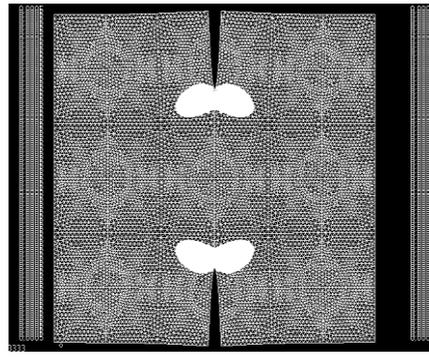


Рис.4. Карта распределения напряжений и деформаций в изотропной структуре на 10 шаге.

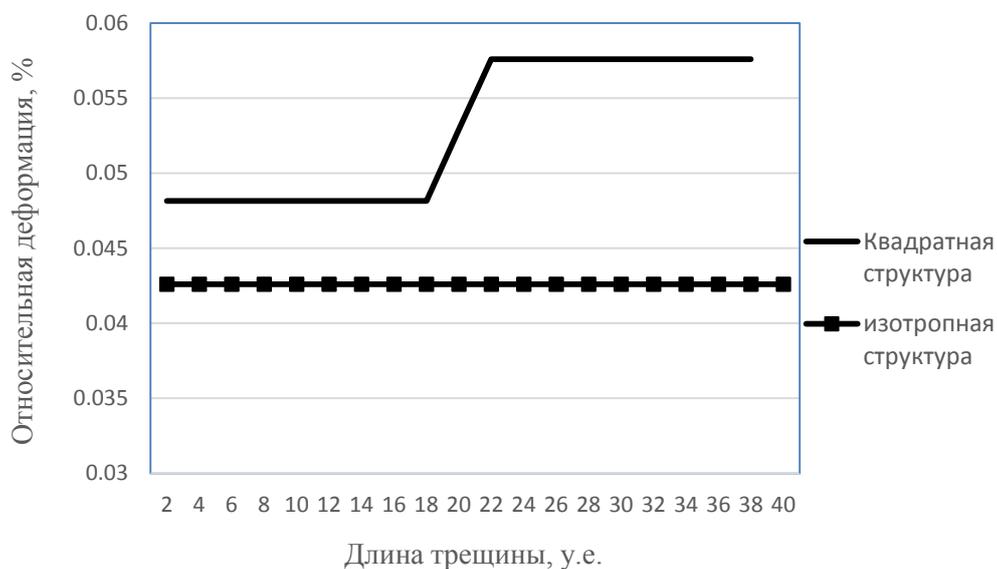


Рис.7. График зависимости длины трещины от относительной деформации.

САПР ТЕПЛОВЫХ РАСЧЕТОВ ОРЕБРЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ТИПА РАДИАТОР

Довгаль Д.В.

Научный руководитель — доцент, к.фарм.н. Бабин С.В.

МАИ, Ступино

danildovgal@gmail.com

При проектировании ребренных конструкций типа радиатор, применяемых в авиационной, бытовой и компьютерной технике, необходимо рассчитывать теплоотдающую способность конструкции и, в дальнейшем, проводить ее оптимизацию.

Экспериментальная доводка конструктивных параметров до необходимых значений требует значительных материальных и временных затрат. Задачи теплового анализа с успехом решаются в современных интегрированных САПР путем построения объемной графической модели, задания граничных условий и применения метода конечных элементов. Недостатком использования интегрированных или специализированных САЕ систем является высокая стоимость приобретения программного обеспечения и затраты на обучения сотрудников как основам 3D моделирования, так и основам теплообмена.

В данной работе представлена САПР тепловых расчетов ребренных конструкция типа радиатор. Анализ теплообмена проводится в условиях свободной конвекции. Программный пакет предназначен для автоматизированного проектирования ребренных конструкций

сложной формы. Свободная модификация структуры оребренной конструкции и проведение математического эксперимента, моделирующего теплоотдачу полученной конструкции, позволяют добиваться оптимальных характеристик радиаторов. Моделирование теплоотдающей способности оребренного радиатора сложного профиля позволяет сделать вывод о тепловой эффективности и удельных характеристиках данной конструкции без проведения натурных экспериментов. Система автоматизированного проектирования оребренных конструкций имеет дружественный интерфейс, не требует глубоких знаний теплообменных процессов, проста в изучении.

Автоматизированное проектирование осуществляется вариацией структуры теплопередающих ребер, прорисовываемой в графическом редакторе

автоматизированной системы, изменением параметров, характеризующих размеры ребер, также варьируются параметры теплоносителя и окружающей среды (Рис.1.).

При моделировании тепло отдающей способности реберной конструкции вычисляются теплоотдачи отдельных элементов ребер, что позволяет оценить вклад каждого элемента в процесс теплоотдачи и оптимизировать размеры и конфигурацию охлаждающей реберной конструкции. Для моделирования теплоотдачи в программе используется решение сопряженной задачи теплообмена при естественной конвекции для ребер и трубы с теплоносителем с граничными условиями четвертого рода и нахождением коэффициентов теплоотдачи итерационным численным методом [1,2].

Ввиду высокой теплопроводности материала ребра считаются термически тонкими. Модель расчета сложных оребренных поверхностей прошла верификацию. Проведение расчетов с помощью данной САПР и сравнение выходных параметров с экспериментальными выходными данными показало, что модель адекватна, точность модели составляет 5-7%. Модель устойчива в заданном диапазоне входных параметров [3].

Апробация САПР оребренных конструкций типа радиатор проходила на Ступинском металлургическом комбинате при проектировании разнообразных конструкций радиаторов отопления, а также на кафедре «Технология производства авиационных двигателей» Ступинского филиала МАИ при проектировании теплоотдающих систем охлаждения масла вспомогательных силовых установок.

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРА СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ ОБРАЗЦОВ ДЛЯ СВМУ ИСПЫТАНИЙ ПРИ ЗАРОЖДЕНИИ И РАННЕМ РОСТЕ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН

Дубинец А.О.

Научный руководитель — доцент, к.т.н. Никитин А.Д.

МАИ, Москва

anisia.dubinets@icloud.com

В последние десятилетия огромный научный интерес представляет проблема разрушения конструкционных материалов в области сверхмногоциклового усталости (количество циклов порядка $10^8 - 10^{10}$). Это связано с возрастающими требованиями к энергоэффективности авиационных и космических силовых установок. Кроме того, в последние годы существенно возросли скоростями циклического нагружения для большинства ответственных элементов современных двигателей. Всё это приводит к значительных циклическим наработкам материалов в то время, как стандарты испытаний не позволяют оценить их прочностных свойств на подобных базах испытаний. Особенностью режима сверхмногоциклового усталости является принципиальная смена механизма зарождения и раннего роста усталостных трещин. В отличие от хорошо известных режимов малоциклового и многоциклового усталости с характерным поверхностным зарождением, в области сверхмногоциклового усталости трещины образуются в объеме материала. Сам процесс зарождения и раннего роста трудно поддается анализу существующими методами визуального контроля. Для фиксации момента роста подповерхностной трещины в последние годы широко применяются методы инфракрасной томографии. Однако, в силу сложностей проведения подобного исследования не все результаты корректно отображают процессы, протекающие в объеме материала. Дополнительным фактором, осложняющим применение подобной методики, для фиксации момента зарождения трещины является

инертность метода. К тому моменту, когда заметные температурные поля могут быть детектированы инфракрасной камерой, зачастую трещина оказывается уже сильно развитой.

В настоящей работе рассматривается альтернативный метод определения момента формирования свободной поверхности или границы раздела в материале на основании анализа спектра собственных частот образца. Теоретически, высокочастотное нагружение реализуется в резонансном режиме, на первой гармонике собственной частоте продольных колебаний при 20 кГц. Области сжатия и разряжения в образце совпадают с узлами смещений стоячих волн, устанавливаемых в пределах рассматриваемого объекта. При формировании в рабочей части свободной поверхности возможно появление дополнительных волновых возмущений, связанных с отражением падающих волн от границы раздела сред. Подобные возмущения могут быть зафиксированы при помощи оптических систем контроля перемещений. Задачей математического моделирования спектра собственных частот образца с растущей трещиной является выявление дополнительных колебательных процессов, связанных с формированием внутренней свободной поверхности, а так же в установлении теоретической разрешающей способности данного метода фиксации момента зарождения подповерхностной трещины.

МЕХАНИЗМ САРРЮСА С ВНУТРЕННИМ СЛОЖЕНИЕМ - МОДЕЛЬ АУКСЕТИКА

Екимовская В.А.

Научный руководитель — доцент, д.т.н. Лебедев В.В.
Московский государственный строительный университет (НИУ), Москва
lera.ek00@mail.ru

Исследования ауксетиков, материалов с отрицательным коэффициентом Пуассона, выполнены, например в [1]. При растягивающей нагрузке такие материалы увеличивают поперечный размер, а не уменьшают, как привычно наблюдается в природе. Оказалось, что такими свойствами обладает система трёхмерных механизмов Саррюса [2]. Этот механизм позволяет получить прямолинейное движение звена. Однако традиционная схема механизма Саррюса не проявляет ауксетических свойств, потому что в нём соединительные шатуны складываются наружу. При растяжении двух параллельных площадок соединяющие их два рычага, коромысло и шатун, распрямляются, поэтому размеры конструкции уменьшаются в поперечном направлении. В некоторых схемах этого механизма применялось сложение соединительных рычагов внутрь конструкции, но полного развития и окончательного оформления технического предложения такая идея не получила, потому что рычаги мешают друг другу двигаться.

Новым техническим предложением является создание фигурных соединительных рычагов, складывающихся внутрь конструкции с целью уменьшения поперечных габаритных размеров. Если соединительные рычаги изготовить в виде пластин не квадратной или прямоугольной формы, а в виде трапеций с такими углами при основании, чтобы при сложении пластины не задевали друг за друга, то механизм будет работать точно так же, как и прототип. Модель такого механизма была изготовлена из бумаги, на ней была подтверждена правильность нового технического решения.

Недостатком предлагаемого механизма Саррюса является ограничение величины растяжения параллельных площадок при сложении соединительных рычагов внутрь конструкции. Если в традиционной схеме механизма Саррюса соединительные рычаги можно изготовить в виде прямоугольников с большой боковой стороной, обеспечив разведение параллельных площадок на удвоенную большую сторону прямоугольника, то при внутреннем сложении расстояния ограничены размерами рабочих площадок механизма. Чтобы устранить этот недостаток, была предложена схема последовательного соединения нескольких механизмов Саррюса. Эта схема работает как при внешнем сложении соединительных рычагов сколь угодно большой длины, так и при внутреннем сложении ограниченных по длине рычажных звеньев.

В процессе изучения нового механизма Саррюса было открыто свойство ауксетика при комбинации таких конструкций. В поперечном сечении новый механизм Саррюса повторяет ячейку часто цитируемого ауксетика [3]. При этом рычажные механизмы-сечения в известной схеме соединяются друг с другом в двух взаимно перпендикулярных

направлениях. Однако такой ауксетик является двумерным с расширением в одном направлении при растяжении в другом направлении. Новый механизм позволяет изготовить трёхмерный ауксетик с расширением в двух направлениях при растяжении в третьем направлении. Более того, квадратную рабочую площадку можно заменить другими видами фигур, например, правильными многоугольниками.

Практическое применение нового механизма Саррюса с уменьшенными габаритными размерами может найти в космической технике для развёртывания больших ферменных конструкций, например, солнечных батарей. Энергопотребление перспективных космических аппаратов и станций увеличивается при сохранении жёстких ограничений на массу и габариты конструкций. В земных условиях новый механизм Саррюса может быть применён для создания подъёмных строительных лесов, площадок, ферм или для переносных быстро возводимых укрытий. Прочностной расчёт конструкций с фермами Саррюса основан на параметрическом исследовании нагрузки стержней или пластин при различных углах взаимной ориентации. Новый механизм, как и традиционное устройство, обладает одной степенью свободы, поэтому для фиксации рабочих площадок или всей конструкции в конечном виде потребуется установить дополнительные упоры, нагрузка на которые тоже будет зависеть от рабочих углов между рычагами.

Таким образом, новый механизм Саррюса позволяет не только уменьшить габаритные размеры перспективных конструкций, но и обладает ауксетическими свойствами при определённой комбинации его конструкций.

Литература

1. Лаврентьев С.Ю., Лисовенко Д.С., Ченцов А.В. Механические свойства двумерной ауксетической конструкции / Сборник трудов. Международная молодёжная научная конференция "44-е Гагаринские чтения 2018". - М.: НИУ МАИ, 2018. - С. 76-78.
2. Механизм Саррюса. – Электронные ресурс: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1562130>
3. Ауксетики – материалы с отрицательным коэффициентом Пуассона. Кафедра Статистической физики Физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета. – Электронный ресурс: https://vk.com/video-3519369_163344968

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРИ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ ЛОКАЛЬНОГО ДЕФОРМАЦИОННОГО ОТКЛИКА МЕТОДОМ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Елеонский С.И.

ЦАГИ, г. Жуковский, Московская обл.

juzzecka@mail.ru

Предложен и верифицирован новый разрушающий метод для количественного описания скорости накопления повреждений в окрестности концентратора напряжений. Увеличение степени поврежденности в зоне, характеризующейся высокими градиентами деформаций, обеспечивается предварительным малоцикловым растяжением-сжатием плоских образцов с центральными сквозными отверстиями. Для выявления уровня накопленных повреждений используется удаление локального объема материала в виде последовательности узких разрезов, которые наносятся при постоянной внешней нагрузке. Начальные точки симметричных разрезов расположены на пересечении контура отверстия и короткой оси симметрии прямоугольного образца. Измерения деформационного отклика на малое приращение длины надреза выполняются на различных этапах циклического нагружения с помощью метода электронной спекл-интерферометрии. Исходная экспериментальная информация имеет вид картин интерференционных полос, которые обеспечивают определение тангенциальных компонент перемещений на берегах надреза. Переход от измеренных перемещений к величинам коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) и Т-напряжений проводится на основе соотношений модифицированной версии метода последовательного наращивания длины трещины.

Введение. Исследования процессов накопления повреждений, зарождения усталостной трещины и ее дальнейшего роста, которые происходят в нерегулярных зонах металлических конструкций, представляют значительный научный и прикладной интерес [1–4]. Особого внимания заслуживают распространенные ситуации, когда высокая скорость процесса зарождения и развития трещины связана со значительным уровнем упругопластических деформаций в зоне концентрации напряжений, в частности, в окрестности сквозного отверстия. Случайные перегрузки с отрицательным коэффициентом асимметрии цикла и/или высокий уровень максимальных напряжений могут также вносить дополнительный вклад в ускорение процесса накопления повреждений. Концентрация напряжений, которая

всегда имеет место в окрестности болтовых/заклепочных соединений, представляет собой основную причину возникновения локальных упругопластических деформаций в условиях реальной эксплуатации авиационных конструкций. В конечном счете, это может приводить к существенному сокращению долговечности вследствие влияния малоциклового усталости.

В настоящее время для прогнозирования процессов зарождения и развития усталостных трещин в материалах, используемых при создании современных авиационных конструкций, в основном, применяются энергетические, феноменологические и микромеханические модели описания повреждаемости материалов на различных этапах циклического нагружения [5–9]. Основным недостатком подобных подходов является тот факт, что в качестве степени поврежденности используются параметры, которые невозможно с достаточной степенью точности определить на основе прямых измерений соответствующих физических величин. Кроме того, ресурсы развития упомянутых выше моделей на основе косвенных экспериментальных данных, которые необходимы для уточнения количественных соотношений, описывающих накопление повреждений, практически исчерпаны.

Одним из перспективных путей повышения количественной составляющей методов, используемых для анализа накопления повреждений и предсказания долговечности конструкций, является привлечение линейной механики разрушения. Весьма подробный обзор, посвященный глубокому пониманию перспектив и ограничений в ходе применения существующих методов механики разрушения для анализа повреждений, представлен в работе Zerbst, Klingner и Clegg [10]. В ней, в частности, специально отмечено, что «... полезность и эффективность любого результата в области анализа повреждений, полученного на основе механики разрушения, существенным образом зависит от его точности».

Усталостное повреждение можно рассматривать, как некоторое механическое событие, которое является ответственным за ослабление микрообъема материала [1–9]. С совокупность этих событий, в конечном счете, приводит к зарождению и возникновению трещины. Первая стадия процесса накопления усталостных повреждений носит скрытый характер. Это означает, что не существует внешних механических проявлений, которые можно измерить и описать количественным образом, вплоть до образования макро-дефекта. Подобное повреждение материала, которое в ряде случаев может быть обнаружено с помощью различных неразрушающих методов, служит источником распространения усталостной трещины [11]. Таким образом, количественное описание процесса накопления усталостных повреждений требует введения какого-либо параметра, который может быть измерен на основе физических принципов.

Экспериментальный подход. Малоцикловое нагружение образцов с концентраторами напряжений, что является главным предметом изучения в данной работе, можно рассматривать как очень эффективный инструмент для быстрого накопления повреждений. Образцы одной и той же геометрии должны быть подвергнуты периодическому нагружению с различным количеством циклов. Этот процесс дает набор объектов исследования с различной степенью накопленных повреждений. Ключевым моментом предлагаемого подхода является тот факт, что плоские образцы с концентраторами напряжений (сквозными отверстиями) испытываются в соответствии с реальными условиями эксплуатации без нанесения начального надреза, который необходим для обеспечения роста трещины. Извлечение измеряемых параметров, которые необходимы для количественного описания процесса накопления повреждений, может быть достигнуто путем нанесения последовательности узких надрезов при постоянной внешней нагрузке. Эти надрезы служат для оценки уровня усталостных повреждений, также как зондирующие отверстия используются для освобождения энергии остаточных напряжений в методе сверления отверстия. Экспериментальный метод основан на измерении локального деформационного отклика на нанесение узкого надреза методом электронной спекл-интерферометрии (рис.1). Исходная экспериментальная информация имеет вид тангенциальных компонент перемещений u и v , которые определяются непосредственно на берегах надреза. Таким образом, величина раскрытия надреза в исходной точке его приращения Δv_0 определяется прямым образом. Переход от измеренных тангенциальных компонент перемещений к искомым величинам КИН и Т-напряжений осуществляется на основе соотношений модифицированной версии метода ПНДТ [12].

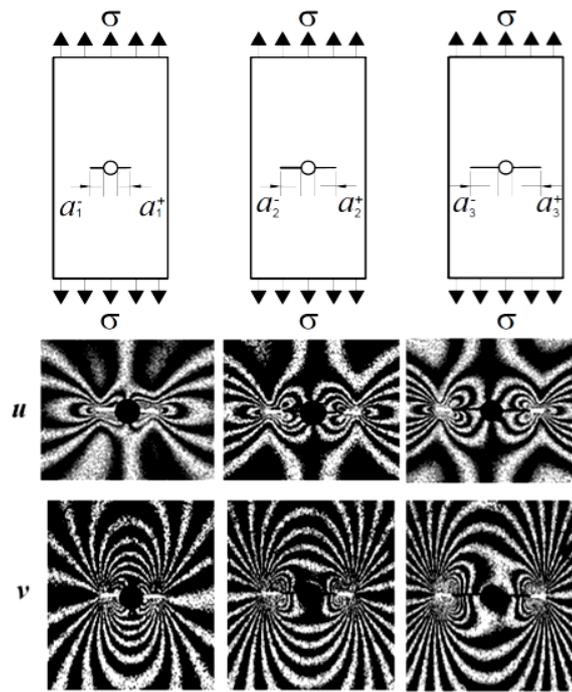


Рис. 1. Схема получения картин интерференционных полос при последовательном увеличении длины надреза.

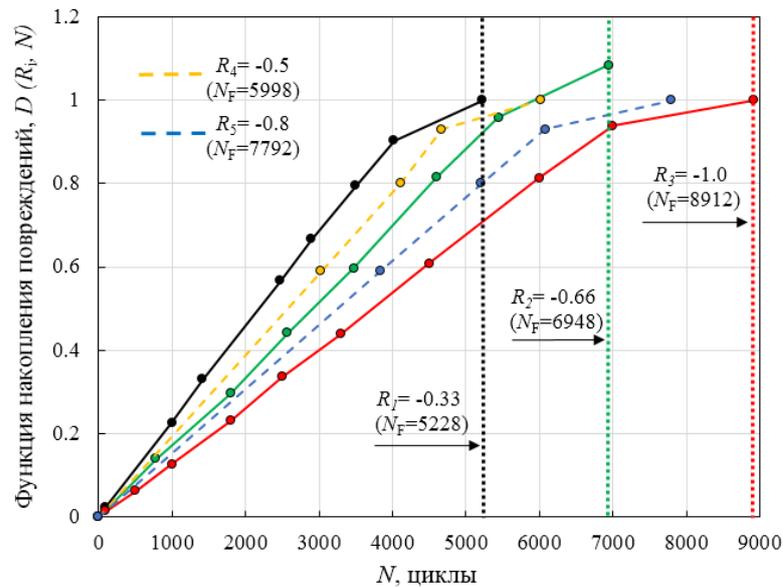


Рис. 2. Функция накопления повреждений для различных значений коэффициента асимметрии цикла: сплошные линии показывают реальные данные; пунктирные линии относятся к прогнозированию.

Результаты исследования. Полученные распределения параметров механики разрушения по длине надрезов на различных этапах циклического нагружения дают возможность построения зависимостей величин раскрытия, КИН и Т-напряжений для надрезов фиксированной длины от количества циклов нагружения. Установлено, что нормализованные зависимости КИН от количества циклов нагружения, построенные для четырех программ циклического нагружения с различными параметрами, отражают влияние коэффициента асимметрии R и размаха напряжений $\Delta\sigma$ цикла на скорость накопления повреждений. При этом влияние характеристик упруго-пластического деформирования на процесс накопления повреждений выражается через величины коэффициентов

интенсивности напряжений $K_I^1(R_i, \Delta\sigma_i, N_m)$, которые получены на различных этапах малоциклового нагружения с различными дискретными значениями коэффициента асимметрии и амплитуды напряжений цикла. С помощью этих данных получен явный вид функции, которая позволяет прогнозировать процесс накопления повреждений для произвольных значений R (рис.2) и $\Delta\sigma$.

Литература

1. Махутов, Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность / Н.А. Махутов. – М.: Машиностроение, 1981. – 272 с.
2. Osgood C.C. Fatigue Design, 2nd edition, Oxford, U.K.: Pergamon Press, 1982. 606 p.
3. Collins J. A. Failure of Materials in Mechanical Design: Analysis, Prediction, Prevention, 2nd edition. NY, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore: John Wiley & Sons, 1993. 672 p.
4. Makhutov N., Matvienko Yu., Chernyakov S. A unified methodological approach to calculation analysis of the stages of nucleation and growth of low-cycle fatigue cracks // Materials Science. 1993. V.29. P. 109–114.
5. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 744 с.
6. Москвитин В.В. Циклическое нагружение элементов конструкций. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. – 344 с.
7. Мовчан А.А. Микромеханический подход к проблеме описания анизотропных рассеянных повреждений // Известия АН СССР. Механика Твёрдого Тела. – 1990, N3. С. 115–123.
8. Мовчан А.А. Механика накопления рассеянных повреждений в элементах конструкций: Учебное пособие. – М.: Издательство МАИ, 1996. – 64 с.
9. Шанявский А.А. Модели зарождения и развития усталостного разрушения под поверхностью металлов // Научный вестник МГТУ ГА. 2012. № 179. С. 32–44.
10. Zerbst U., Klinger C., Clegg R. Fracture mechanics as a tool in failure analysis – prospects and limitations // Engineering Failure Analysis. 2015. V.55. P. 376-410; doi:10.1016/j.engfailanal.2015.07.001.
11. Ostash O. P. New approaches in fatigue fracture mechanics // Materials Science. 2006. V.42. P.5-19.
12. Pisarev V.S., Matvienko Y.G., Eleonsky S.I., Odintsev I.N. Combining the crack compliance method and speckle interferometry data for determination of stress intensity factors and T-stresses // Engineering Fracture Mechanics. 2017. V.179. P.348–374.

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НЕРАЗБИРАЮЩИХСЯ КОНСТРУКЦИЙ

Жигалова А.И.

Научный руководитель — доцент, д.т.н. Лебедев В.В.
МГТУ им. Н.Э.Баумана, Мытищинский филиал, Мытищи
aelita99@list.ru

Применение аддитивных технологий приводит к необходимости пересмотра или дополнения действующей нормативно-технической документации. В частности, это относится к понятию сборочной единицы. Понятия детали, сборочной единицы, комплекса, комплекта и т.д. регламентированы в Государственных стандартах. В соответствии с ГОСТ 2.101-68 сборочная единица это изделие, составные части которого подлежат соединению между собой на предприятии-изготовителе сборочными операциями. Под сборочными операциями понимают пайку, сварку, развальцовку и другие действия. Но аддитивные технологии позволяют изготовить сборочную единицу, состоящую из нескольких деталей, которые в принципе нельзя соединить с помощью перечисленных операций. Пояснить принцип неразбирающейся конструкции можно на примере сувенира «предмет в бутылке». Например, в сувенирных магазинах можно увидеть модель парусника, расположенного в бутылке, но размеры корабля намного больше узкого горлышка. Ясно, что сборку сувенира проводили через узкое горлышко методом соединения отдельных деталей. Однако конструкторы предъявляют к сборочным единицам всё более жёсткие требования, в том числе относительно технологического процесса. Актуальной становится задача сборки конструкции даже из двух деталей, одну из которых невозможно в принципе поместить в другую, как отдельные части сувенира в приведённом примере. С такой задачей столкнулись конструкторы строительной опалубки для последующего армирования и заливки раствора бетона. Времена простых форм зданий и сооружений прошли, дизайнеры и архитекторы предлагают новые решения, которые, казалось бы, в принципе нельзя реализовать на практике из-за нарушений традиционных основ технологических процессов. В конкретной конструкции требовалось изготовить опалубку сложной формы из двух частей – внутренней и наружной. Таким образом, сборочная единица состояла всего лишь из двух

деталей, изготовить каждую из которых не представляло труда. Каждая из двух деталей могла быть изготовлена как аддитивными технологиями, так и традиционными методами. Но после изготовления комплекта из двух деталей никак не получалось завершить создание сборочной единицы, потому что внутренняя деталь не проходила в узкое отверстие внешней детали. Внешняя деталь хотя и была больше внутренней в целом, но узкое горлышко не позволяло провести через него внутреннюю деталь, габаритный размер которой был больше размера горлышка. Для устранения появившегося противоречия между конструкторскими требованиями и технологическими возможностями было предложено применить аддитивные технологии нетрадиционным способом. Обычно с помощью аддитивных технологий изготавливают отдельные конкретные детали сложной формы, а потом эти детали соединяют в сборочную единицу. Для новой неразбирающейся конструкции было предложено изготовить аддитивными технологиями сразу две детали. На основании 3D принтера были установлены сразу две заготовки так, чтобы сразу же внутренняя деталь «выпеклась» внутри внешней детали. Постепенное и одновременное наложение слоёв сразу на внутреннюю и внешнюю опалубки сложной формы позволило забыть об узком горлышке, о сборке, о традиционной нетехнологичности и т.д. После изготовления внутренняя опалубка оказалась расположенной внутри внешней опалубки, но конечно, извлечь её наружу было нельзя. Но это и не нужно. Цель работы была достигнута – сборочная единица из двух нетехнологичных деталей была создана.

Для иллюстрации и демонстрации нового технологического процесса создания неразбирающихся конструкций был изготовлен учебно-методический комплект, показывающий суть новых действий. Первая пара деталей из учебно-методического комплекта показывает, как внутренняя опалубка размещена внутри внешней опалубки без возможности её извлечения наружу. Внутренняя опалубка подвижна относительно внешней опалубки, но извлечь её наружу нельзя, потому что неразбирающаяся конструкция изготовлена аддитивными технологиями как единое целое, но из двух деталей. Вторая пара деталей показывает, как две опалубки закреплены на основании – приклеены к нему. Основание – это третья деталь, но её можно закрепить на сборочной единице традиционными операциями. Конечно, аддитивные технологии позволяют основание тоже изготовить как одно целое с опалубками. Третья демонстрационная модель содержит арматурные прутья, введённые в свободное пространство между внутренней и внешней опалубками. Эта модель демонстрирует готовность конструкции к заливке наполнителем. Наконец, четвёртая модель залита наполнителем – эпоксидной смолой. На практике в больших конструкциях силовым наполнителем служит раствор строительного бетона.

Таким образом, возможность создания неразбирающихся конструкций обоснована не только теоретически предложением нового технологического процесса, но и доказана практически созданием учебно-методического комплекта деталей и сборочных единиц.

РОЛЬ НЕЙТРАЛЬНЫХ СОБСТВЕННЫХ ТОЧЕЧНЫХ ДЕФЕКТОВ В ФОРМИРОВАНИИ ОБЛАСТИ ГОМОГЕННОСТИ ZnSe

Журавлев Н.О.

Научный руководитель — доцент, к.ф.-м.н. Кобелева С.П.

НИТУ МИСиС, Москва

zurik.n@gmail.com

Проведены расчеты границы области гомогенности ZnSe со стороны избытка Zn. В модели дефектообразования учитывали дефекты Шоттки по обеим подрешеткам соединения и дефекты Френкеля по подрешетке цинка. Рассматривали как нейтральные, так и одно- и двукратно заряженные дефекты. На основе сравнения расчетов и экспериментальных данных выяснена роль нейтральных дефектов в формировании области гомогенности ZnSe.

Селенид цинка является полупроводниковым материалом, который возможно использовать в различных областях электроники и оптики, например в сине-голубых диодах, детекторах рентгеновского излучения, инфракрасной оптике (мощных CO₂ лазерах), а так же в качестве сердечников для оптоволокна [1,2].

Возможность получения высокочистого селенида цинка методом химического парофазного осаждения играет немаловажную роль в перспективности его применения. Данный метод позволяет регулировать условия роста (давление компонентов, температуру),

что, в свою очередь отражается на том, какой дефектный состав будет у выращенного материала, а так же избыток какого компонента будет в полученном соединении.

Наличие у селенида цинка достаточно широкой области гомогенности (до 10^{-3} ат. %), а также и то, что собственные точечные дефекты (СТД) электрически активны, дает возможность получения нелегированных монокристаллов того или иного типа проводимости (так называемое самолегирование). Задача моделирования – определение технологических условий получения материала с минимальной концентрацией СТД. Для этого необходимо знать как типы СТД так и термодинамические параметры их образования. Вместе с тем, работ по изучению СТД в ZnSe очень мало и данные их разнятся [3,4]. Полученные в последнее десятилетие экспериментальные данные об отклонении от стехиометрии на границах области гомогенности ZnSe [4] позволяют уточнять модель дефектообразования в ZnSe. В работе анализировали составы на границе области гомогенности со стороны избытка Zn.

Основой для изучения зависимости концентраций СТД от температуры и состава равновесной паровой фазы является метод квазихимических реакций (КХР) [5]. В методе КХР образование каждого типа СТД описывается реакцией, проходящей при равновесии твердого тела и паровой фазы. Концентрация СТД зависит от парциального давления компонента в паровой фазе (в данной работе - парциальное давление цинка P_{Zn}) и, если дефект электрически активный, от концентрации свободных электронов (n) и дырок (p). Каждому типу КХР соответствует константа КХР, зависящая от температуры по активационному закону. При описании высокотемпературного равновесия решается уравнение электронейтральности, в котором имеются две независимые переменные, в нашем случае это P_{Zn} и n . На границах области гомогенности парциальные давления компонентов равны давлению насыщенного пара избыточного компонента. В данной работе использовали данные [6]: $\log P_{Zn} = -\frac{6678,4}{T} + 9,5787 - 0,55407 \cdot \ln T$.

В целом в ZnSe в основном рассматривают следующие типы дефектов: вакансии цинка (V_{Zn}), селена (V_{Se}) и междоузельный цинк (Zn_i). Все типы дефектов могут быть в нейтральном, одно и двукратно ионизированном состоянии. На границе области гомогенности со стороны избытка Zn доминируют дефекты донорного типа (Zn_i и V_{Se}). Поскольку в междоузлии атомы находятся в условиях гидростатического сжатия, выгоднее минимизировать объем атома, поэтому Zn_i будет двукратно заряженным донором, в то время как V_{Se} является достаточно глубоким донором, так что и при высоких температурах в основном находится в нейтральном или однократно заряженном состоянии. Уровень Ферми в таком материале будет находится в верхней половине запрещенной зоны, поэтому вакансии цинка (акцептор) будет двукратно ионизованной. В таком случае уравнение электронейтральности будет иметь вид:

$$n = [V_{Se}^{\cdot}] + 2([Zn_i^{\cdot\cdot}] - [V_{Zn}^{\prime\prime}]), \quad (1)$$

где $[]$ – означают концентрации соответствующих дефектов; x^{\cdot} - положительно заряженный дефект донорного типа; x^{\prime} - отрицательно заряженный дефект акцепторного типа.

Расчеты проводили для интервалов (1000 – 1400) К. Экспериментально определенные δ отличаются на два порядка от n (p) на границе области гомогенности [4]. Такое различие может быть объяснено с привлечением двух моделей: компенсирующего действия вакансии Zn или присутствием большой концентрации нейтральных СТД. На роль нейтрального дефекта в ZnSe со стороны избытка цинка подходит V_{Se} , являющаяся глубоким донором (энергия однократной ионизации 1,4 эВ). При 1000 К отношение нейтральных вакансий селена к однократно заряженным порядка 240, а при 1400 К – 200, то есть концентрация нейтральных вакансий даже при высоких температурах на два порядка выше, чем концентрация заряженных вакансий. Это по порядку величины совпадает с разностью между δ и n (p). Нейтральные и заряженные вакансии селена связаны соотношением [7]:

$$\frac{[V_{Se}^{\cdot}]}{[V_{Se}]} = \frac{n}{2N_c} \exp\left(\frac{E_i}{kT}\right), \quad (2)$$

где N_c – плотность состояний на дне зоны проводимости ZnSe; n – экспериментальное значение n на границе области гомогенности [8]; k – константа Больцмана; E_i – энергия

однократной ионизации. Примем, что $V_{Se}^{\times} = \delta$. В этом случае система уравнений (1-2) позволяет определить V_{Se} и $[Zn_i^{\cdot}] - [V_{Zn}^{\cdot}]$.

Температурная зависимость δ , n , V_{Se} и $(Zn_i - V_{Zn})$, представлена на рисунке 1.

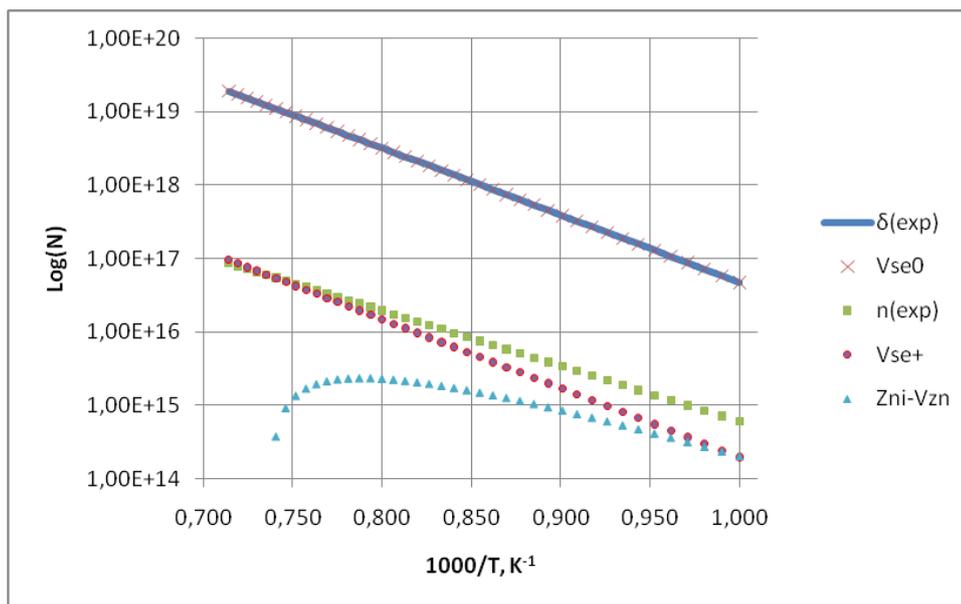


Рис.1. Зависимость концентраций дефектов, δ [4] и n [8] на границе области гомогенности ZnSe (Zn).

При относительно низких температурах $Zn_i > V_{Zn}$ и концентрация межузельного цинка сопоставима с концентрацией однократно ионизированных вакансий селена. При повышении температуры концентрация компонент пары Френкеля сравнивается и выше 1360 К – $V_{Zn} > Zn_i$. Следовательно,

$$E_{V_{Zn}} > E_{Zn_i} + 2E_{P_{Zn}}, \quad (3)$$

где $E_{P_{Zn}} = 1,19$ эВ – энтальпия испарения цинка.

В [3] приведены энергии образования нейтральных дефектов Шоттки ($E_{V_{Se}} + E_{V_{Zn}} = 4,4$ эВ) и Френкеля ($E_{Zn_i} + E_{V_{Zn}} = 4,55$ эВ), что, с учетом (3), позволяет провести оценки энергий образования нейтральных дефектов.

Значения отдельных энергий образования дефектов, удовлетворяющий всем трем условиям, можно найти определяя одну из энергий. За основу расчетов в работе рассматривали энергию образования нейтрального межузельного цинка в интервале от 0,5 до 4 эВ. Условие (3) выполняется только для интервала значений E_{Zn_i} от 0,5 до 1 эВ. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Энергии образования дефектов.

E_{Zn_i} , эВ	$E_{V_{Zn}}$, эВ	$E_{V_{Se}}$, эВ	$E_{Zn_i} + 2E_{P_{Zn}}$, эВ
0,5	4,05	0,35	2,88
0,6	3,95	0,45	2,98
0,7	3,85	0,55	3,08
0,75	3,8	0,6	3,13
0,8	3,75	0,65	3,18
0,9	3,65	0,75	3,28
1	3,55	0,85	3,38

Экспериментальное значение энергии активации δ составляет 0,6 эВ [4]. Поскольку мы предполагали, что на границе области гомогенности доминирует нейтральная вакансия

селена, то ее энергия образования будет равна 0,6 эВ, т.е. энергии образования дефектов равны: $E_{V_{Se}} = 0,6$ эВ, $E_{Zn_i} = 0,75$ эВ, $E_{V_{Zn}} = 3,8$ эВ. Эти значения отличаются от ранее предложенных в работе [3], но позволяют удовлетворительно описать как границу области гомогенности со стороны избытка цинка, так и концентрацию свободных электронов на этой границе.

Литература

1. Кульчицкий Н., Наумов А., Семенов В. Современные оптоэлектронные приборы на основе селенида цинка // Фотоника, No. 6, 2015, с. 90 – 99.
2. Гавришук Е.М. Поликристаллический селенид цинка для инфракрасной оптики. – Неорганические материалы, 2003, т. 39, № 9, с.1031–1049.
3. Морозова Н.К., Пащенко Ю.А., Боровкова С.Г. Анализ равновесия собственных точечных дефектов в ZnSe // Химия твердого тела. Свердловск, 1988. С. 55 – 62. (Межвуз. сб. науч. тр. УПИ)
4. Аветисов И.Х. Фазовые равновесия в системах $A_{II}B_{VI}$. В сборнике «Высокочистые вещества». – М.: Научный Мир, 2018, с. 704 – 753.
5. Крёгер Ф. Химия несовершенных кристаллов / Под ред. О.М. Полторака. М.: Мир, 1969. 654 с.
6. Sharma R., Chang Y. The S-Zn (Sulfur-Zinc) System // Journal of Phase Equilibria Vol. 17 No. 3 1996.
7. Saraie J., Kitagawa M., Tanaka T. Effect of excess component element during LPE on electrical properties of CdTe // Journal of The Electrochemical Society Vol. 126 No. 12 1979.
8. Smith F.T.J. Evidence for a native donor in ZnSe from high temperature electrical measurements // Solid State Communications Volume 7, Issue 24, 15 December 1969, Pages 1757–1761

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ В ЗАДАЧАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ МАТЕРИАЛОВ КВД

Загидуллин А.Д., Мухамадеев И.М., Муратаев Т.А., Махмутянов А.Н.

Научный руководитель — доцент, к.т.н. Муратаев Ф.И.

КНИТУ-КАИ, Казань

Полотно и ободная часть дисков, а особенно рабочие лопатки компрессоров ГТД в эксплуатации подвергаются комбинированному усталостному термо-силовому воздействию. Это требует проведения очень сложных по реализации и продолжительных по времени стендовых испытаний натуральных элементов и имитационных исследований металла при доводке агрегатов и изделий в целом [1-5].

В настоящей работе анализируются результаты имитационного моделирования (ИМ) поведения титановых и никелевых сплавов, мартенситных сталей в условиях переменного двухчастотного изгиба с растяжением и изменяющегося закона воздействия температуры. На этой основе по экспериментальным данным в т.ч. многочисленных работ [6-15] получены количественные соотношения для расчета и прогнозирования усталостной прочности и долговечности по начальным условиям работы, учитывающих НДС, уровень и характер действующих нагрузок и температуры.

Способность металла лопаток сопротивляться усталости при комбинированном воздействии (растяжения и изгиба) в условиях изменения температуры ведется по обобщенному условию предельных амплитуд высокочастотной составляющей вида [5, 7]:

$$\frac{\sigma_{a2}}{\sigma_{-1}} = 1 - R_1 \left(\frac{\sigma_{\max_1}}{\sigma_{R_1}} \right)^{n_1} - (1 - R_1) \left(\frac{\sigma_{\max_1}}{\sigma_{R_1}} \right)^{n_2}, \quad (1)$$

при необходимости эквивалентные двухосные напряжения равны:

$$\sigma_{Re1} = \sigma_{X1}(1 - \chi_m) + \chi_m (\sigma_{X1}^2 + \sigma_{Y1}^2 - 2\mu\sigma_{X1}\sigma_{Y1})^{0,5} \quad (2)$$

$$n_2 = B_1 + B_2 \frac{\sigma_{\max_1}}{\sigma_{R_1}} - B_3 \frac{E_k}{E} + B_4 \frac{\mu}{\Psi} + B_5 \frac{m^{(0)}\Psi}{\delta}, \quad (3)$$

где $\sigma_{\max_1} = \sigma_D + \sigma_C$ - сумма действующих и температурных напряжений; свойства берутся при t_{\max} (в °С).

$$\overline{E}_k = E_k / E = \left[1 + \frac{E}{S_k} \ln \left(\frac{1}{1-\psi} \right) \right]^{-1,0}, \text{ - относительный модуль Ильюшина} \quad (4)$$

$$m^{(0)} = 0,75 \ln \frac{S_k}{\sigma_{0,2}} \left\{ \ln \left[\left(\frac{\sigma_{0,2}}{E} + 0,2 \cdot 10^{-2} \right)^{-1,0} \left(\frac{S_k}{E} + \ln \frac{1}{1-\psi} \right) \right] \right\}^{-1,0}, \quad (5)$$

- коэффициент деформационного упрочнения [5, 7].

При обосновании материалов и технологий следует отдавать предпочтение структурным состояниям сплавов с большими значениями характеристик S_k , $m^{(0)}$, ψ и меньшими E_k . Снижение циклической долговечности (N/N_1) при двухчастотных нагрузках (σ_{a2}) относительно гармонического контролируется выражениями (2, 3, 6) в зависимости от кривой усталости (γ) в области малоциклового долговечности (N_1) с учетом параметров нагружения (σ_{max1}) степени двухосности (σ_{Re1}), характеристик прочности и пластичности (3) при max температуре - $n(t)$ по условию:

$$N_1 / N = 1 - \left(\sigma_{a_2} / \sigma_{-1}^t \right)^{\gamma/n(t)}. \quad (6)$$

По данным ИМ снижение циклической долговечности (N/N_1) при двухчастотных нагрузках зависит от угла наклона кривой малоциклового усталости (γ) и (N_1), уровня действующих напряжений (σ_{max1}), плоского НДС (σ_{Re1}), характеристик S_k , $m^{(0)}$, ψ и E_k в при max эксплуатационной температуре - $f n(t)$, обеспечивая хорошую сходимость расчетов.

Для упрощения процедуры обоснования технологий и выбора материалов предлагается методика неразрушающего контроля по характеристикам микроиндентирования, с помощью твердомера «SHIMADZU DUN-211S» пирамидкой Берковича. Она иллюстрируется примером оптимизации режимов термической обработки по микроструктуре стали 13X11H2B2MФ [7]. Единственным показателем (из 14 проанализированных), согласующимся с характеристиками КП материалов, является разность глубин от вдавливания индентора при постоянной нагрузке, по инструкции - «ползучесть при постоянной нагрузке - СИТ». На наш взгляд более точно - располагаемая пластичность индентирования (РПИ) на верхней площадке диаграммы: вдавливания – выдержка - разгрузка. Рис.1 иллюстрирует уровень этого свойства протяженностью площадок вдавливания пирамидки по вариантам термической обработки (а - с) образцов стали 13X11H2B2MФ в соответствие с таблицей 2. Из представленных данных видно хорошее согласие характеристик структуры и свойства ψ с показателем РПИ.

Таким образом, по результатам проведенных комплексных исследований выявлены технологии и структурные состояния материалов, обеспечивающие функциональность и длительную работу сложной техники. Для этого используются характеристики истинной диаграммы деформирования, расчетные оценки усталостной долговечности, влияние эксплуатационной и стендовой наработки на параметры структуры жаропрочных сплавов (ее повреждаемость). Причем стали или сплавы обладают большей КП при меньших значениях E_k и больших величинах S_k , $m^{(0)}$ и ψ . Кроме того, в работе предложен критерий «располагаемая пластичность индентирования», позволяющий не разрушая металл адекватно и достоверно обосновывать принятие технологических решений и выбор материала.

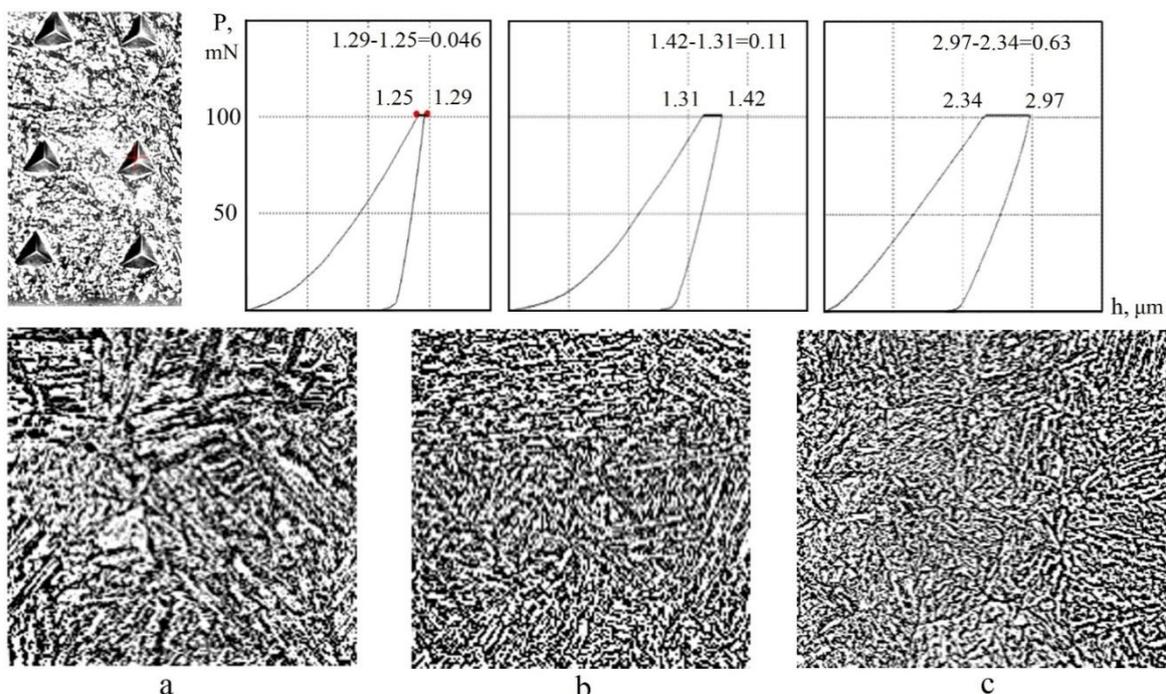


Рис. 1. Определение располагаемой пластичности индентирования и соответствующие вариантам термической обработки (а - с) табл. 2 структурные состояния стали 13X11H2B2MФ.

Таблица 2. Влияние режимов термической обработки на механические свойства стали включая показатель РПИ

№ п/п вариант	Состояние стали 13X11H2B2MФ		HV ₁₀₀ *	σ _B	ψ	РПИ
	Двойная закалка	Отпуск	МПа·10 ⁻¹	МПа	%	
1 (а)	После эксплуатации		~370	1180	41	6,18
2 (b)	(1020 + 1000)°С - масло	560°С	512	1540	55	8,78
3 (с)	(1020 + 1000)°С - масло	640°С	380	1230	72	23,78

Литература

1. Муратаев Ф.И., Муратаев А.Ф. Исследование повреждаемости металла дисков компрессора ГТУ // ISSN 2078-6255. Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева 2016 №4. С. 31-35.
2. Муратаев Ф.И., Муратаев А.Ф. Влияние состава и морфологии интерметаллической фазы сплава IN-738LC на повреждаемость лопаток газовых турбин // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева 2015 №3 С.43-48.
3. Ф.И. Муратаев, А.Ф. Муратаев Структура и свойства конструкционной стали после длительного перегрева // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева 2016 №3. С. 82-86.
4. А.Г. Братухин, М.А. Погосян, Л.В. Тарасенко. Конструкционные и функциональные материалы современного авиастроения. М.: МАИ, 2007. 301с.
5. Муратаев Ф.И., Жаржаназы М.А. Обеспечение конструкционной прочности титановых сплавов по критериям предельной пластичности и сопротивления усталости // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева, 2013. №1. С.50-54
6. Муратаев Ф.И., Мухамадеев И.М. Закономерности структурных состояний и характеристик конструкционной прочности штамповок титанового сплава // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева 2020 №2.
7. F I Murataev et al 2019 IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering.570 012070.
8. Клабуков М.А., Колесников Д.Н. Согласование характеристик структуры и свойств титановых сплавов. // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева 2020 №2
9. F I Murataev et al Substantiation of domestic material and welding technology for improving properties and competitiveness of pyrolysis furnace coils 2019 IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering 570 012071.
10. Муратаев Ф.И., Загидуллин А.Д. Обеспечение стойкости сварных соединений аустенитных сталей к межкристаллитной коррозии // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева, 2019. №2. С. 45-50.
11. Муратаев Ф.И., Махмутянов А.Н., Муратаев Т.А. Превращения титановых сплавов в лазерном пятне при ударном упрочнении // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева 2020 №2.
12. Ar. J. McEvily "Metal Failures: Mechanisms, Analysis, Preventions" by JohnWiley-ISP. // Перевод / Мак-

Ивили Анализ аварийных разрушений. Москва: Техносфера, 2010.-416с.

13. Муратаев Ф.И., Хакимов С.Ш. Обоснование соотношений микроструктуры и свойств титановых сплавов для задач прогнозирования сопротивления усталости. // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева 2014 №4. С.110-114.

14. Муратаев Ф.И., Шканов И. Н. Обоснование технологии обработки дисков компрессоров по характеристикам статического и циклического деформирования // Известия вузов «Авиационная техника», 1999, № 1. с. 43-47.

15. Муратаев Ф.И., Клабуков М.А. Исследование закономерностей структуры и усталостной повреждаемости литых лопаток из сплава IN-738LC // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева, 2014. № 3. С. 107-109.

МОДЕЛЬ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ПЬЕЗОМЕХАНОДИФфуЗИИ С УЧЕТОМ РЕЛАКСАЦИИ ДИФфуЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Зверев Н.А.¹, Земсков А.В.^{1,2}

¹МАИ, Москва

²НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

nikolayzverev1995@gmail.com

В работе рассмотрены нестационарные пьезоэлектромагнитные и диффузионные процессы в многокомпонентном упругом твердом теле при наличии релаксации диффузионных потоков. Предполагается, что обратный пьезоэффект отсутствует, что позволяет рассматривать задачу в несвязанной постановке. Для её решения используются интегральное преобразование Лапласа по времени и разложение Фурье по пространственной координате. Найдены поля перемещений и приращений концентраций внутри слоя. Получены формулы для электрического и магнитного полей в пьезоэлектрике. Выполнены тестовые расчеты для пьезокерамического материала. Результаты расчетов представлены в аналитической форме и в виде графиков.

Введение. В последнее время все больший научный и практический интерес представляют связанные нестационарные модели механики деформируемого тела, в частности, модели механо-диффузии, поскольку диффузия, влияя на напряженно-деформированное состояние тела, может оказывать также и нежелательное воздействие на конструкции или их отдельные элементы. Например, диффузия, вызывая движение вакансий и дислокаций, может влиять на процесс трещинообразования и старения материалов. В связи с этим, представляется практически важным вопрос о качественной и количественной оценке взаимодействия механических и диффузионных полей. Также немаловажную роль в вопросах моделирования технических систем играет учет электромагнитных полей, наличие которых может вызывать пьезоэлектрические и пьезомагнитные эффекты.

Постановка задачи. В работе рассматривается одномерная нестационарная задача об определении напряженно-деформированного состояния многокомпонентного пьезоэлектромагнитного слоя с учетом явления массопереноса (рис.1).

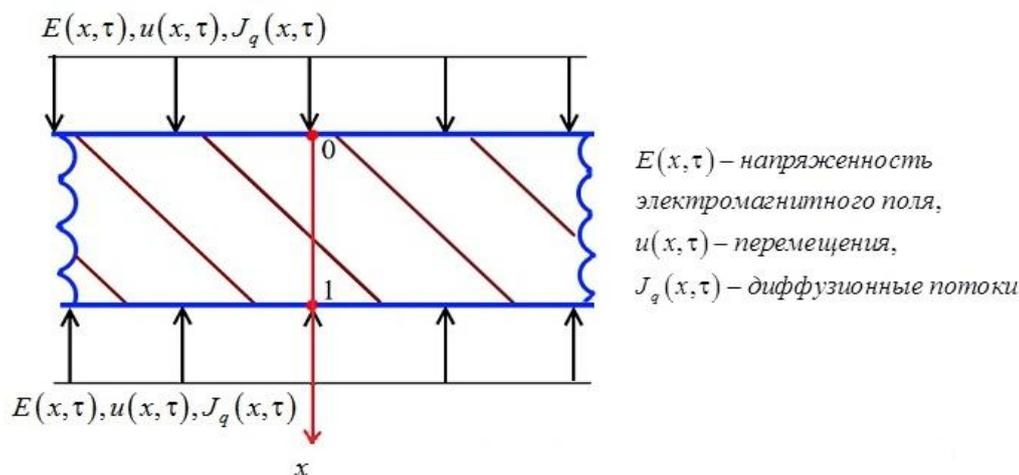


Рис.1. Иллюстрация к постановке задачи.

При рассмотрении переноса вещества учитываются релаксационные эффекты, характеризующиеся конечными скоростями распространения диффузионных возмущений. Физико-механические процессы, протекающие в данном теле, которое можно рассматривать

как сплошную однородную среду, описываются системой дифференциальных уравнений в частных производных, состоящей из линеаризованных уравнений движения, массопереноса и уравнений Максвелла [1-5]:

$$\begin{aligned} \ddot{u} &= u'' - \sum_{q=1}^N \alpha_q \dot{\eta}'_q, \quad \dot{\eta}_q + \tau_q \ddot{\eta}_q = D_q \eta''_q - \Lambda_q u''' \quad q = \overline{1, N}, \\ E' &= -\mu_h \dot{H} - \Gamma \dot{u}' - \sum_{q=1}^N X_q \dot{\eta}'_q, \quad -H' = \varepsilon_e \dot{E} + K \dot{u}' + \sum_{q=1}^N B_q \dot{\eta}'_q. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь все величины являются безразмерными и для них приняты следующие обозначения:

$$\begin{aligned} x &= \frac{x_1}{L}, \quad u = \frac{u_1}{L}, \quad \tau = \frac{Ct}{L}, \quad \tau_q = \frac{C\tau^{(q)}}{L}, \quad E = \frac{E_2}{E^*}, \quad H = \frac{4\pi c H_3}{E^*}, \quad C_{ijkl} = \frac{C_{ijkl}^*}{C_{1111}^*}, \quad C^2 = \frac{C_{1111}^*}{\rho}, \\ \alpha_q &= \frac{\alpha_{11}^{(q)}}{C_{1111}}, \quad D_q = \frac{D_{11}^{(q)}}{CL}, \quad \Lambda_q = \frac{m^{(q)} n_0^{(q)} D_{11}^{(q)} \alpha_{11}^{(q)}}{\rho RT_0 CL}, \quad \varepsilon_e = \frac{C \varepsilon_{22}^{(e)}}{4\pi c^2}, \quad \mu_h = 4\pi C \mu_{33}^{(h)}, \\ \Gamma &= \frac{C \gamma_{112}}{c E^*}, \quad K = \frac{4\pi C \kappa_{113}}{E^*}, \quad B_q = \frac{m^{(q)} n_0^{(q)} D_{11}^{(q)} E^* \beta_2^{(q)}}{4\pi \rho RT_0 CL}, \quad X_q = \frac{m^{(q)} n_0^{(q)} D_{11}^{(q)} \chi_3^{(q)} E^*}{(4\pi)^2 \rho c RT_0 CL}, \end{aligned} \quad (2)$$

где t - время; x_i - прямоугольные декартовы координаты; ρ - плотность среды, u_i - перемещения, T_0 - начальная температура среды; n_0^q , η^q и m^q - начальная концентрация, приращение концентрации и молярная масса q -го компонента вещества; c - скорость света; C_{ijkl}^* - компоненты тензоров упругих постоянных; ε_{ij}^e и μ_{ij}^h - тензоры диэлектрической и магнитной проницаемости; κ_{ijk} и γ_{ijk} - тензоры пьезоэлектрических и пьезомагнитных постоянных; $\alpha_{ij}^{(q)}$ - коэффициенты объемного расширения из-за диффузии; D_{ij}^q - коэффициенты самодиффузии; E_i и H_i - компоненты векторов электрической и магнитной напряженности; L - толщина слоя; E^* - масштабное значение электрической напряженности. Коэффициенты β_i^q и χ_i^q характеризуют связь электромагнитного и диффузионного поля; τ^q - время релаксации диффузионных возмущений.

Начально-краевые условия, замыкающие математическую постановку задачи, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} E|_{x=0} &= 0, \quad E|_{x=1} = 0, \quad u|_{x=1} = 0, \quad \Lambda_q u'' - D \eta'_q \Big|_{x=1} = 0, \\ u|_{x=0} &= f_1 \tau, \quad \Lambda_q u'' - D \eta'_q \Big|_{x=0} = f_{q+1} \tau, \\ E|_{\tau=0} &= 0, \quad H|_{\tau=0} = 0, \quad u|_{\tau=0} = 0, \quad \dot{u}|_{\tau=0} = 0, \quad \eta|_{\tau=0} = 0, \quad \dot{\eta}|_{\tau=0} = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь $f_k \tau$ $k = \overline{1, N+1}$ - поверхностные возмущения.

Метод решения. В данной задаче обратный пьезоэлектрический, пьезомагнитный и диффузионно-электрический эффекты слабо выражены, что позволяет решать задачу механодиффузии отдельно от задачи электромагнетизма. Поэтому, вначале рассматривается задача механодиффузии. Её решение записывается так [6,7]:

$$u = \sum_{k=1}^{N+1} \int_0^\tau G_{1k} x, \tau - t f_k t dt, \quad \eta_q = \sum_{k=1}^{N+1} \int_0^\tau G_{q+1,k} x, \tau - t f_k t dt. \quad (4)$$

Здесь $G_{mk} x, \tau$ - поверхностные функции Грина задачи упругой диффузии, которые найдены в работах [6,7].

Решение задачи электродинамики ищется в виде ($0 < \xi < 1$)

$$E = \sum_{l=1}^2 \int_0^\tau \int_0^1 G_l^E x, \xi, \tau - t F_l \xi, t dt d\xi, \quad H = \sum_{l=1}^2 \int_0^\tau \int_0^1 G_l^H x, \xi, \tau - t F_l \xi, t dt d\xi, \quad (5)$$

где G_l^E и G_l^H - объемные функции Грина, которые являются решением следующих задач (

δ_{ml} - символ Кронекера, $\delta x-\xi, \tau$ - функция Дирака)

$$G_l^{E'} = -\mu_h \dot{G}_l^H - \delta_{1l} \delta x-\xi, \tau, \quad -G_l^{H'} = \varepsilon_e \dot{G}_l^E + \delta_{2l} \delta x-\xi, \tau, \quad (6)$$

$$G_l^E|_{x=0} = 0, \quad G_l^E|_{x=1} = 0. \quad (7)$$

Величины $F_l \xi, t$, в соответствии с (1), определяются следующим образом:

$$F_1 x, t = \Gamma \dot{u}' + \sum_{q=1}^N X_q \dot{\eta}_q, \quad F_2 x, t = K \dot{u}' + \sum_{q=1}^N B_q \dot{\eta}_q. \quad (8)$$

Функции Грина G_l^E и G_l^H в задаче (6), (7) ищутся с помощью интегрального преобразования Лапласа по времени и разложения искомым функций в тригонометрические ряды Фурье по синусам и по косинусам. Оригиналы изображений Лапласа определяются с помощью таблиц операционного исчисления [8]. Функции напряженностей электрического и магнитного полей определяются как свертки (5) функций Грина задачи механодиффузии с правыми частями граничных условий задачи (1), (2).

В качестве расчетного примера рассматривается пьезокерамический слой [9], на поверхности которого заданы возмущения вида

$$f_1 \tau = H \tau, \quad f_{q+1} \tau = 0,$$

где $H \tau$ - функция Хевисайда.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №17-08-00663).

Литература

1. Tarlakovskii D.V., Vestyak V.A., Zemskov A.V. Dynamic Processes in Thermoelectromagnetoelastic and Thermoelastodiffusive Media // Encyclopedia of thermal stress, volume 2, C-D, Springer Dordrecht Heidelberg New York London, Springer reference. 2014. – pp. 1064 – 1071.
2. N.A. Zverev, A.V. Zemskov, D.V. Tarlakovskii. One-dimensional problem of piezoelectric electromagnetic diffusion for a layer // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – No 1129. – 012040.
3. Земсков А.В., Тарлаковский Д.В. Постановка одномерной задачи термоэлектромагнитоупругой диффузии // Материалы XXIV Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Т.2. - М.: ООО «ТРИП», 2018. – с. 157-163.
4. Deswal S., Kalkal K. Electromagneto-thermodiffusive problem for short times without energy dissipation // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2013. – Vol. 86, No. 3. – P. 705-715.
5. Kumar R., Chawla V. Fundamental Solution for the Plane Problem in Magnetothermoelastic Diffusion Media // CMST. – 2013. – Vol. 19, No 4. – P. 195-2077.
6. Давыдов С.А., Земсков А.В., Тарлаковский Д.В. Поверхностные функции Грина в нестационарных задачах термомеханодиффузии // Проблемы прочности и пластичности. – 2017. - Т. 79, №1. – с. 38-47.
7. Вестяк А.В., Давыдов С.А., Земсков А.В., Тарлаковский Д.В. Нестационарная одномерная задача термоупругой диффузии для однородных многокомпонентных сред с плоскими границами // Ученые записки Казанского университета. Серия физико-математические науки. – 2018. – Т. 160, Книга 1. – с. 183-196.
8. Диткин В.А., Прудников А.П. Операционное исчисление. Учеб. пособие для вузов. Изд. 2, доп. М.: «Высшая школа», 1975, 408 с.
9. Бардзокас Д.И., Зобнин А.И., Сенюк Н.А., Фильштинский М.Л. Математическое моделирование в задачах механики связанных полей. Т.1: Введение в теорию пьезоэлектричества. – М.: КомКнига. – 2005. – 312 с.

МОДЕЛЬ ОДНОМЕРНОЙ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ЗАДАЧИ УПРУГОЙ ДИФФУЗИИ ДЛЯ ОРТОТРОПНОГО СПЛОШНОГО ЦИЛИНДРА С УЧЕТОМ РЕЛАКСАЦИИ ДИФФУЗИОННЫХ ПОТОКОВ

Зверев Н.А.

Научный руководитель — доцент, д.ф-м.н. Земсков А.В.

МАИ, Москва

NikolayZverev1995@gmail.com

Рассмотрена одномерная полярно-симметричная задача механодиффузии для ортотропного сплошного цилиндра. Построено аналитическое решение в изображениях, и в оригиналах Лапласа. Найдены функции влияния, вычислены двойные свертки, позволяющие отыскать искомые функции механических перемещений цилиндра и функцию приращения концентрации. Построены и проанализированы графические зависимости искомым функций от времени и от радиальной координаты.

Постановка задачи. В работе рассматривается связанная полярно-симметричная задача, состоящая в определении напряженно-деформированного состояния сплошного ортотропного N - компонентного однородного цилиндра, находящегося под воздействием нестационарных упругодиффузионных возмущений. Математическая модель, описывающая связанные упругодиффузионные процессы в N - компонентной среде в произвольном криволинейном базисе, имеет вид [1-3]:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 u^i}{\partial t^2} &= \nabla_j (C^{ijkl} \nabla_l u_k) - \sum_{r=1}^N \nabla_j (\alpha^{(r)ij} \eta^{(r)}) + \rho F^i \quad (i, j, k, l = \overline{1, 3}, \quad q = \overline{1, N}), \\ \frac{\partial \eta^{(q)}}{\partial t} + \tau^{(q)} \frac{\partial^2 \eta^{(q)}}{\partial t^2} &= \nabla_i (D^{(q)ij} \nabla_j \eta^{(q)}) - \frac{m^{(q)} n_0^{(q)}}{\rho R T_0} \nabla_i [D^{(q)ij} \nabla_j (\alpha^{(q)kl} \nabla_l u_k)] + F^{(q)}, \end{aligned} \quad (1)$$

где t – время; u^i – компоненты вектора перемещений; x^j – криволинейные координаты; ∇_j – ковариантная производная по криволинейной координате x^j ; $\eta^{(q)}$ – приращение концентрации вещества; $n_0^{(q)}$ – начальная концентрация q - го вещества в составе N - компонентной среды; $m^{(q)}$ – молярная масса q - го вещества в составе N - компонентной среды; $\mathbf{C} = C^{ijkl} \mathbf{e}_i \mathbf{e}_j \mathbf{e}_k \mathbf{e}_l$ – тензор упругих постоянных; ρ – плотность среды; $\boldsymbol{\alpha}^{(q)} = \alpha^{(q)ij} \mathbf{e}_i \mathbf{e}_j$ – упругодиффузионный тензор, характеризующий деформации, возникающие вследствие диффузии; $\mathbf{D}^{(q)} = D^{(q)ij} \mathbf{e}_i \mathbf{e}_j$ – тензор самодиффузии; R – универсальная газовая постоянная; T_0 – температура среды; $\mathbf{F} = F^i \mathbf{e}_i$ – удельная плотность объёмных сил, $F^{(q)}$ – объёмная плотность источников массопереноса; $\tau^{(q)}$ – время релаксации диффузионных потоков.

В случае одномерных полярно-симметричных процессов, вектор массовых сил и объёмная плотность источников массопереноса будут иметь следующий вид:

$$\mathbf{u} = \{u_r(r, t), 0, 0\}, \quad \eta^{(j)} = \eta^{(j)}(r, t), \quad \mathbf{F} = \{F_r(r, t), 0, 0\}, \quad F^{(q)} = F^{(q)}(r, t), \quad (2)$$

где r – радиальная координата, а u_r и F_r – физические компоненты вектора механических перемещений и вектора массовых сил.

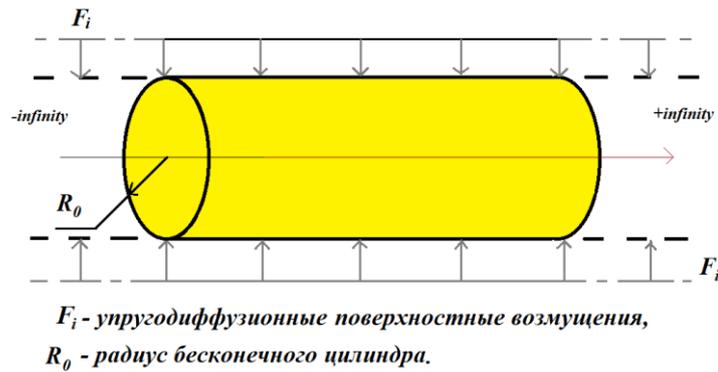


Рис.1. Иллюстрация к постановке задачи.

Вычисляя ковариантные производные в (1), с учетом (2), для ортотропной среды получаем следующую систему дифференциальных уравнений [1-2]:

$$\begin{aligned} \ddot{u} &= u'' + \frac{u'}{r} - \frac{u}{r^2} - \sum_{q=1}^N \alpha_q \eta_q' + F_1, \\ \dot{\eta}_q + \tau_q \ddot{\eta}_q &= -\Lambda_q \left(u''' + \frac{2u''}{r} - \frac{u'}{r^2} + \frac{u}{r^3} \right) + D_q \left(\eta_q'' + \frac{\eta_q'}{r} \right) + F_{q+1}. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь точки означают производную по времени, штрих – производную по радиальной координате. Все величины в (3) являются безразмерными и для них приняты следующие обозначения:

$$\begin{aligned} r^* &= \frac{r}{L}, \quad u = \frac{u_r}{L}, \quad \tau = \frac{Ct}{L}, \quad C^2 = \frac{c_{11}}{\rho}, \quad c_{ij}^* = \frac{c_{ij}}{c_{11}}, \quad \eta_q = \eta^{(q)}, \quad \tau_q = \frac{C\tau^{(q)}}{L}, \\ \alpha_q &= \frac{\alpha_1^{(q)}}{c_{11}}, \quad D_q = \frac{D_1^{(q)}}{CL}, \quad \Lambda_q = \frac{\Lambda_{11}^{(q)}}{CL}, \quad F_1 = \frac{F_r L}{c_{11}}, \quad F_{q+1} = \frac{F^{(q)} L}{C}. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь характерный размер L выбирается таким образом, чтобы безразмерный радиус цилиндра равнялся c_{12} .

Считаем, что на поверхности цилиндра заданы радиальные нагрузки и кинематические диффузионные условия. В этом случае граничные условия имеют вид

$$\left. \left(\frac{\partial u}{\partial r} + c_{12} \frac{u}{r} - \sum_{j=1}^N \alpha_j \eta_j \right) \right|_{r=\lambda} = f_1(\tau), \quad \eta_q \Big|_{r=\lambda} = f_{q+1}(\tau). \quad (5)$$

Начальные условия полагаем нулевыми.

Метод решения. В интегральной форме общее решение задачи (3), (5) записывается следующим образом [1,2]

$$\begin{aligned} u(r, \tau) &= \sum_{m=1}^{N+1} \int_0^t G_{1m}(r, \tau) f_m(t-\tau) d\tau + \sum_{m=1}^{N+1} \int_0^t \int_0^\lambda \tilde{G}_{1m}(r, \xi, \tau) F_m(\xi, t-\tau) d\tau d\xi, \\ \eta_q(r, \tau) &= \sum_{m=1}^{N+1} \int_0^t G_{q+1,m}(r, \tau) f_m(t-\tau) d\tau + \sum_{m=1}^{N+1} \int_0^t \int_0^\lambda \tilde{G}_{q+1,m}(r, \xi, \tau) F_m(\xi, t-\tau) d\tau d\xi, \end{aligned} \quad (6)$$

где $G_{1m}(r, \tau)$ – поверхностные функции Грина, $\tilde{G}_{1m}(r, \xi, \tau)$ – объемные функции Грина рассматриваемой задачи.

Для нахождения функций Грина применяется интегральное преобразование Лапласа по времени и разложение искомых функций в ряды Бесселя по радиальной координате. Обращение преобразования Лапласа осуществляется аналитически с помощью вычетов и таблиц операционного исчисления.

Путем перехода к бесконечным скоростям распространения диффузионных потоков, исследовано влияние релаксации на поля диффузии и механических перемещений внутри цилиндра. Также, переходя к классическим полярно-симметричным задачам теории упругости, проанализировано влияние массопереноса на напряженно-деформированное состояние сплошного цилиндра.

Литература

1. Зверев Н.А., Земсков А.В., Тарлаковский Д.В. Сплошной ортотропный цилиндр под действием поверхностных полярно-симметричных стационарных возмущений // Материалы XXIII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Т.2. - М.: ООО «ТР-принт», 2017. – с. 132-137.
2. Земсков А.В., Тарлаковский Д.В. Полярно-симметричная задача упругой диффузии для многокомпонентной среды // Проблемы прочности и пластичности. – 2018. – № 80 (1). – с. 5-14.
3. Aouadi M. A problem for an infinite elastic body with a spherical cavity in the theory of generalized thermoelastic diffusion // International Journal of Solids and Structures. 2007. – Vol. 44. – P. 5711-5722.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЛАВЛЕНИЯ И КРИСТАЛЛИЗАЦИИ СИСТЕМЫ Si-AL МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

Зеленина А.И., Гордеев И.С.

Научный руководитель — к.ф-м.н. Колотова Л.Н.

МФТИ, Долгопрудный

zelenina.ai@phystech.edu

Кремниевые нанообъекты очень интересны для нанофотоники из-за уникальных оптических свойств, зависящих от атомарной структуры, подобные вещества находят

применение в различных областях. Особенно важны на практике структуры, в состав которых входят такие металлы, как золото и алюминий. Для того, чтобы осуществить разработку подобных материалов необходимо получить представление о фазовых переходах (плавлении и кристаллизации) подобных веществ.

В данной работе представлены результаты расчетов методом молекулярной динамики фазовой диаграммы Si-Al во всем интервале концентраций металла. Методом прямого двухфазного моделирования рассчитаны кривые ликвидуса и плавления. Суть метода заключается в том, что в расчетной ячейке создаются две фазы при фиксированном давлении и температуре: расплав и гцк-фаза. Далее по перемещению фазовой границы делается вывод о стабильности той или иной фазы. Таким же методом были рассчитаны температуры плавления чистых Al, Au, Si при широком диапазоне давлений с целью верифицировать новый потенциал. Доклад содержит примеры промежуточных результатов (изображения моделированных процессов) и графики температурных зависимостей.

Сравнение рассчитанных фазовых диаграмм с экспериментальными данными позволяет сделать вывод о том, что данный потенциал можно использовать для расчетов процесса кристаллизации бинарной системы Si-Al. Также были проведены сравнения с экспериментальными данными. Все расчеты проведены с использованием пакета LAMMPS, иллюстрации созданы в среде OVITO.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОРИСТОСТИ В ОТЛИВКАХ ИЗ СПЛАВА МЛ10 С ПОМОЩЬЮ КРИТЕРИЯ НИЯМЫ

Иванина Е.С.

Научный руководитель — профессор, д.т.н. Монастырский В.П.
Московский Политех, Москва
ivalee13@mail.ru

Одним из распространенных дефектов при получении отливок методом литья является пористость. При разработке систем питания отливок при помощи компьютерного моделирования большое значение имеет прогноз возникновения газовой и усадочной пористости. На практике для прогнозирования пористости применяют различные критерии, наиболее распространенным из них является критерий Ниямы.

Согласно данному критерию там, где он ниже некоторой критической величины гарантированно будет образовываться пористость. Существует множество исследований, направленных на экспериментальное определение критического значения критерия Ниямы для различных сталей и сплавов. Например, для низколегированных сталей критическое значение определено самим автором критерия [1].

Трудности использования критерия Ниямы связаны с тем, что не существует единого критического значения этого критерия для различных сплавов и различных условий получения отливок. Одним из важных направлений исследований является поиск универсального критерия качества отливки.

В данной работе при помощи компьютерного моделирования в программе СКМ «ПолигонСофт» было проведено исследование связи расчетной пористости с критерием Ниямы. Для вычислительного эксперимента в качестве объекта исследований была выбрана плита из магниевого сплава МЛ10. Выбор данной отливки обусловлен ее простой геометрией удобной для анализа [2,3].

В вычислительном эксперименте проводилось моделирование процесса кристаллизации отливки в кокиле и в форме из холодно-твердеющей смеси (ХТС). Для выявления зависимости была проведена серия расчетов для кокиля с различными температурами - 200, 300, 400, 500°C. Температура металла в расчете составляла 720°C, кристаллизация происходила в воздухе при температуре 20°C.

В результате вычислительного эксперимента были получены кривые, связывающие пористость со значением критерия Ниямы для различных условий получения отливки, определяемых температурой и материалом формы. Определены критические значения критерия Ниямы для данной отливки в зависимости от температуры кокиля.

Установлено, что в рамках условий вычислительного эксперимента не существует единая для рассмотренных технологических процессов количественная зависимость усадочной пористости от критерия Ниямы. Полученная зависимость является неоднозначной: при

одном и том же значении критерия Нияма пористость может различной в зависимости от параметров технологического процесса.

Получена однозначная зависимость в виде $f(G,W)=P_i$ между объемной долей пор и тепловыми условиями в двухфазной зоне отливки, где G - градиент температуры, W - скорость кристаллизации, P_i - уровни постоянной пористости. Данная диаграмма обобщает результаты моделирования для различных технологических условий (разная температура формы) и разных материалов формы (кокиль, ХТС).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-38-90099/19.

Литература

1. Niyama E., Uchida T., Morikawa M., Saito S. A Method of Shrinkage Prediction and its Application to Steel Casting Practice // AFS International Cast Metals Journal, 1982, vol. 7, no. 3, pp. 52-63.
2. Carlson K.D., Ou Shouzhui, Beckermann C. Feeding of high-nickel alloy castings // Metallurgical Transactions B, v. 36B, Dec. 2005, pp. 843-856.
3. Carlson K.D., Ou Shouzhui., Hardin R.A., Beckermann C. Development of New Feeding-Distance Rules Using Casting Simulation: Part I. Methodology // Metallurgical Transactions B, v.33B, Oct. 2002, pp. 731-740.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ ПРЯМЫМ МЕТОДОМ В ЗАДАЧИ ОБ ОТСЛОЕНИИ ДВУХСЛОЙНОЙ ПОЛОСЫ

Идрисов Д.М.
ИПМех РАН, Москва
idrisov.dim@mail.ru

Задача, о трещине на границе контакта двухслойной полосы, имеет большое практическое применение, например для расчета коэффициентов интенсивности напряжений в стандартных испытаниях [1], изучение процессов разрушения в слоистых структурах [1-5]; исследование расслоения тепловых и экологических покрытий [6].

Для определения коэффициентов интенсивности напряжений существует множество различных методов, такие как метод перемещений, метод податливости, энергетический метод и т.д. Но не один из этих методов не позволяет рассчитать КИН на границе контакта двух анизотропных тел [6,7], так как все эти методы в основном были сформулированы для однородных изотропных тел.

КИН определяется как коэффициент при сингулярном члене для соответствующей компоненты тензора напряжений, где сингулярность имеет вид, единицы деленной на квадратный корень из расстояния до вершины трещины. Существуют численные методы, позволяющие рассчитать КИН напрямую из этого определения. Этот метод известен как прямой метод [8]. Суть его заключается в том, что используя распределение напряжений вдоль границы контакта двух слоев, полученные из результатов численного моделирования, вычисляется произведение соответствующей компоненты тензора напряжений на квадратный корень от расстояние до вершины трещины. Для полученного выражения строится график зависимости от расстояния до вершины трещины. Значение КИН из построенного графика, находится с помощью линейной экстраполяции. При этом следует исключить точки, лежащие непосредственно у вершины трещины, так как в этой области точность численного метода заметно снижается.

Используя прямой метод напряжений, были получены значения КИН для плоскодеформированного состояния, с четырьмя типами нагружения, с соотношением толщин полос 1/2.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 19-51-52003.

Литература

1. Suo Z., Hutchinson J.W. Interface Crack Between Two Elastic Layers // Int. J. Fract. – 1990. – Vol. 43. – P. 1–18.
2. Hutchinson J.W., Suo Z. Mixed Mode Cracking in Layered Materials // Advances in Applied Mechanics. Eds. J.W. Hutchinson, T.Y. Wu. – 1992. – Vol. 29. – P. 63–191.
3. Ustinov K.B. On influence of substrate compliance on delamination and buckling of coatings // Eng. Fail. Analys. – 2015. – Vol. 48B – P. 338–344.
4. Ustinov K., On separation of a layer from the half-plane: elastic fixation conditions for a plate equivalent to the layer // Mech. Solid. – 2015. – Vol.50 (1) – P. 62–80.
5. Salganik R., Ustinov, K., Deformation problem for an elastically fixed plate modeling a coating partially delaminated from the substrate (plane strain) // Mech. Solid. – 2012. Vol.47 (4) – P. 415–425.
6. Suo Z., Hutchinson J.W. Interface crack between two elastic layers // Int. J. Fract. – 1990. – Vol. 43. – P. 1–18.

7. Bowie, O. L., Analysis of an infinite plate containing radial cracks originating at the boundary of an internal circular hole // J. Math. and Phys. –1956. – Vol.25 – P. 60–71.

8. Нисиока Т., Атлури С. Вычислительные методы в динамике разрушения // Вычислительные методы в механике разрушения. М.: Мир, 1990. С. 267–321.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОГО УПРАВЛЯЕМОГО ТЕРМОРАСКАЛЫВАНИЯ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ОБЪЁМНОМ ПОГЛОЩЕНИИ ЭНЕРГИИ ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА

Каптаков М.О.¹, Булычев Н.А.^{1,2}, Колесник С.А.¹, Бучанов В.В.³, Муравьев Э.Н.⁴,
Ревенко В.И.³

¹МАИ, Москва;

²ФИАН, Москва;

³АО «НИТС им. В.Ф.Солинова», Москва;

⁴АИН им. А.М.Прохорова, Москва

В последние десятилетия активно развивается и внедряется в производственные технологии метод лазерной резки хрупких материалов, основанный на явлении разделения материалов упругими силами, возникающими в неоднородных температурных полях. Необходимые для разделения листов натриево-силикатного стекла градиенты температуры возникают в результате локального лазерного нагрева до температур существенно ниже температуры размягчения стекла, часто, в сочетании с локальным охлаждением. Линия разделения материала плавно следует за лазерным лучом, перемещающимся относительно заготовки. При этом процесс происходит без испарения или возгонки материала. Этот метод был назван лазерным управляемым термораскалыванием и был связан с поверхностным нагревом непрозрачных материалов [1]. Теоретические представления, связанные с поверхностным поглощением излучения в стекле, например, излучения CO₂- лазера с длиной волны 10,6 мкм, по большей части, не применимы для резки, например, неодимовым или иттербиевым лазерами, поскольку в первом случае стекло непрозрачно, а во втором - почти полностью пропускает излучение. В работе рассмотрены условия управляемого развития сквозной трещины, образованной в результате локального нагрева лазерным излучением в листе натрий-силикатного стекла при условии малого поглощения излучения.

Введение. Облучение листового стекла лазерным излучением иттербиевого лазера индуцирует появление областей растягивающих и сжимающих напряжений в объеме и на поверхности стекла. Распределение этих напряжений зависит от трех основных параметров, таких как, диаметр пятна облучения, толщина стекла, скорость движения пятна облучения во время резки. С изменением мощности пропорционально изменяется величина напряжений, но пространственная картина распределения напряжений остается неизменной (это справедливо в рамках линейной теории термоупругости, когда физические свойства материала предполагаются независимыми от температуры).

Рассмотрим расчетный пример облучения стекла М1 толщиной 6 мм параллельным гауссовским пучком диаметром 4 мм (по уровню 0,6 интенсивности). Для определенности, мощность лазера выбиралась равной 600 Вт, хотя, как указывалось, приведенные ниже значения напряженностей масштабируются на любую другую мощность (в рамках линейной теории термоупругости).

Будем предполагать, что луч лазера равномерно перемещается вдоль оси X в положительном направлении. Поэтому нас, в первую очередь, будут интересовать поперечные напряжения $S_y(x,y,z)$ (ось Z направлена по нормали к поверхности пластины). На рис.1,2 а), отличающиеся скоростью V движения пятна облучения, показаны установившиеся по времени профили распределения напряжения S_y на поверхности ($z = 0$) при текущем падении луча точку с координатой $y = 40$. Текущее значение центра пучка облучения обозначено на графиках стрелкой. Как видно из графиков, на периферии пятна облучения образуются две области растягивающих положительных напряжений. При движении пятна облучения эти области не исчезают, хотя и значительно трансформируются, и они обеспечивают продвижение трещины. На рис.1 б) показаны распределения S_y - напряжений вдоль оси Y в точке $x = 48$, соответствующей одному из двух одинаковых по величине максимумов напряжений. Из графика можно видеть, что вблизи линии предполагаемого движения пятна ($y = 40$) слева и справа располагаются области сжимающих напряжений. Эти области сохраняются и при движении пятна облучения и препятствуют отклонению трещины от линии реза (см. рис. 2, 3 б).

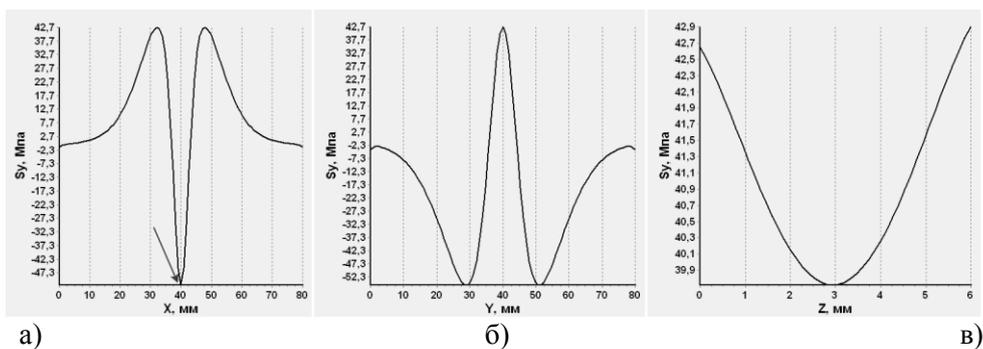


Рис.1. Скорость $V=0$ мм/с.

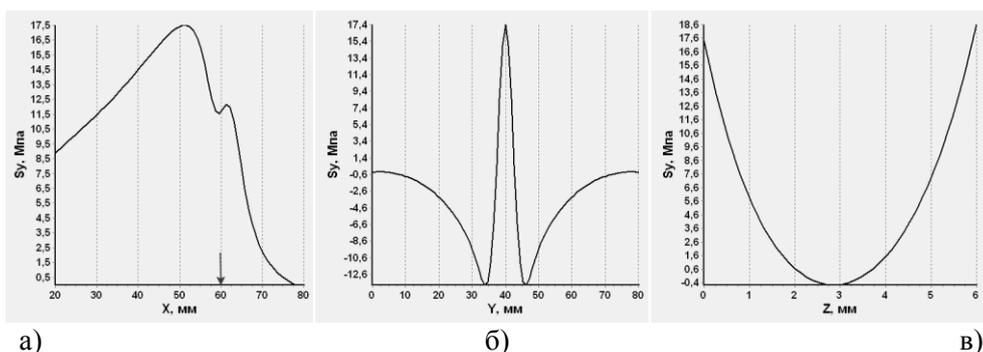


Рис.2. Скорость $V = 12$ мм/с.

На рис.1-3 в) показаны распределения напряжений по толщине стекла в точке по оси X , соответствующей максимуму напряжения. Характерным является то, что при движении пятна растягивающее напряжение максимально на поверхностях и быстро падает вглубь стекла. Вблизи срединной плоскости, параллельной поверхности, напряжение становится сжимающим.

На всех приведенных выше графиках рис.1-3 а) можно видеть два локальных максимума напряжения, расположенных по разные стороны от точки центра пятна облучения. Распределения напряжений в поперечном направлении (по оси Y) и по толщине стекла (по оси Z) существенно отличаются по разные стороны от этой точки. Поэтому, для удобства, будем называть область впереди пятна облучения фронтальной зоной, а область позади пятна- хвостовой зоной.

На рис.3 сравниваются распределения напряжений во фронтальной и хвостовой зоне. Как можно видеть из графика на рис.3, во фронтальной зоне ($X = 63$ мм) напряжение положительно (т.е.растягивающее) по всей толщине стекла, а в хвостовой зоне ($X = 54$ мм)- оно положительно только вблизи поверхности стекла и при этом быстро падает по направлению к центру, а в срединной области напряжение отрицательно (т.е. сжимающее).

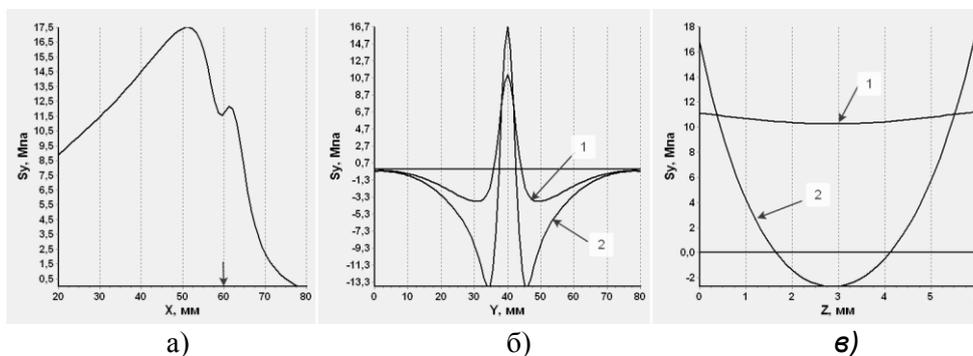


Рис.3. Сравнение распределений напряжений на поверхности стекла в областях впереди и сзади от места падения луча: 1- распределение напряжений при $X = 63$ мм; 2 распределение напряжений при $X = 54$ мм. Скорость $V = 12$ мм/с.

Вдоль поперечной координаты, как можно видеть из графиков на рис. 3 б), контрастность между растягивающим напряжением на линии движения пятна излучения и сжимающим напряжением в непосредственной близости от этой линии существенно выше в хвостовой зоне. В хвостовой зоне растягивающее напряжение сосредоточено вблизи поверхности (рис.3 в), и на пути возможного распространения трещины по толщине стекла располагается область сжимающих напряжений, которую трещина пытается обогнуть. Поэтому в тех экспериментах, когда трещина зарождается в хвостовой зоне, торец получается достаточно сложной формы в стеклах толщиной более 3 мм. Напротив, во фронтальной зоне область сжимающих напряжений внутри стекла отсутствует и в этом случае следует ожидать получения плоского торца. Однако при зарождении трещины во фронтальной зоне, как отмечалось выше, ее движение неустойчиво.

Литература

1. Г.А. Мачулка «Лазерная обработка стекла - Москва «Советское Радио», 19792. Источник

АНАЛИЗ НОВИЗНЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ АВИАЦИОННЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС.

Караванова А.Г.

Научный руководитель — профессор, д.т.н. Калашников А.С.
Московский Политех, Москва
alexandr_kalashnikov45@rambler.ru

Идеальное течение металла, которые зависят от давления материала для расчета матрицы экструзии. В частности, принимается модель двойного скольжения и вращения модели сдвига материала. Проведено сравнение скольжение материала детали, которые нужны для выявления шероховатости поверхности зубчатых колёс. Показано, что угол внутреннего трения детали влияет на распределение контактного давления материала.

В авиационной промышленности используются двигатели, агрегаты, узлы, детали и зубчатые колеса. Целью является достигнуть 5-й степени, а в перспективных изделиях - 4-й степени (по ГОСТ 1 41671-91, ГОСТ 2789-73, ОСТ 1 41667-89).

Задача. Повысить точность оптимизациям технологии изготовления зубчатых колес. Так же возможность исключить концентрации нагрузок на локальных участках поверхности зубьев. Процесс химико-термического упрочнения зубьев при нагреве до температуры 500... 600°C приводит к отсутствию дефектов на детали. Что дает возможность обеспечивать заданную твердость сердцевины и несущего слоя; высокое качество поверхностного слоя; макро-геометрии контакта зубчатых колес, которые требуется определяться исходя из выявления шероховатости поверхности $Ra \geq 0,2$ мкм.

Методы и цели исследования. Выявление остаточных напряжений зубчатых колес с помощью хонингования зубчатых колёс. Большинство операций упрочнения могут выполняться на универсальных металлорежущих станках (токарных, строгальных, сверлильных) с использованием простых по конструкции приспособлений. Хонингование зубчатых колес – операция, при которой частица твердого металла, с большой скоростью (90 – 150 м/с), ударяют по упрочняемой поверхности, и происходит её наклеп.

Толщина упрочненного слоя составляет 0,2 – 0,4 мм. Дробеструйному наклепу подвергают пружины, рессоры, зубчатые колеса, валы торсионные и т.п. Дробеструйная обработка нормализованной стали марки 20 увеличивает твердость на 40 %, а стали марки 45 – на 20 %; остаточное напряжение сжатия в поверхности – до 80 МПа.

После хонингования детали станок выключается автоматически. Время зубохонингования хорошо обработанных шестерён колеблется от 2 до 6 мин., для предварительно шлифованных шестерён — от 0,5 до 2 мин.; время указано для притирки двух шестерён одновременно. Обдувка и притирка даёт точность по шагу шестерни 0,010—0,015 мм, по эксцентricности — примерно до 0,04—0,05 мм. Допустимое напряжение зубчатых колёс обрабатывается исходя из усталостного ресурса передач. Напряжение возникает из-за условий внешней нагрузки, макро-геометрии зубчатого колеса и трибологических системы контакта зуба, на которую также влияет качество поверхности боковых поверхностей зуба.

Вывод. В процентном соотношении предел выносливости увеличивается на 50-60% или в 3 - 3,5 раза. Из практических данных мы знаем, что наработка на отказ обычной детали составляет 720 часов, то теоретически мы можем предположить, что наработка на отказ упрочненной детали будет примерно 2500 часов. Твердость обработки хонингования зубчатых колёс, которые имеют твердость 45-52HRC. Качество обработки зубчатых колёс шероховатость поверхности $Ra = 0,2$ мкм, и остаточное напряжение после упрочнение детали $B = 204,85$ кгс/мм².

МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ АМОРФНОГО СПЛАВА Zr-Nb

Клявинек С.С.

Научный руководитель — к.ф.-м.н. Колотова Л.Н.
ОИВТ(РАН), Долгопрудный
klyavinekss@gmail.com

На сегодняшний день аморфные металлические сплавы представляют особый интерес, поскольку, благодаря своей некристаллической структуре, обладают необычными физическими свойствами. В данной работе исследован сплав Zr-Nb, поскольку он уже активно используется в различных областях промышленности, к примеру, при создании оболочек ТВЭЛов. В моделировании использовался ADP-потенциал с параметризацией [1], изучение структуры проводилось с помощью программы OVITO [2]. В ходе исследований обнаружено, что икосаэдрические кластеры являются основными структурными элементами аморфного сплава Zr-Nb, заполняющими весь объем сплава. Показана связь между резким возрастанием таких кластеров в при переходе из жидкости в стекло и расщеплением второго пика ПКФ. С помощью многогранников Вороного рассмотрены особенности строения аморфного сплава. Определено, что икосаэдрические кластеры образует практически полностью только Nb, Zr этого не делает. Данное явление объяснено с помощью стерического фактора. По различным структурным критериям, таким как возрастание числа икосаэдрических кластеров, расщепление второго пика ПКФ, площадь под вторым пиком ПКФ и критерий Вендта-Абрахама определена температура стеклования Zr-Nb в зависимости от процентного содержания Nb. Полученные данные находятся в хорошем согласии друг с другом. Также температура стеклования определена с помощью изменения теплоемкости при переходах "жидкость-стекло" и "стекло-жидкость", с помощью коэффициентов диффузии. Полученные данные также находятся в хорошем согласии друг с другом. Были исследованы упругие свойства аморфного Zr-Nb в зависимости от процентного содержания Nb, получены значения модуля упругости при сжатии и растяжении. Моделирование проводилось с помощью пакета LAMMPS [3].

Литература

1. Smirnova D. E., Starikov S. V. An interatomic potential for simulation of Zr-Nb system //Computational Materials Science. – 2017. – Т. 129. – С. 259-272.
2. A. Stukowski Visualization and analysis of atomistic simulation data with OVITO - the Open Visualization Tool Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. 18 (2010), 015012
3. Plimpton S. Fast parallel algorithms for short-range molecular dynamics //Journal of computational physics. – 1995. – Т. 117. – №. 1. – С. 1-19.

ИЗМЕНЕНИЕ СОСТАВА, СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СПЛАВА ВТ6 ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ

Колесников Д.Н., Загидуллин А.Д., Мухамадеев И.М.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Муратаев Ф.И.
КНИТУ-КАИ, Казань
Dmitry_kolesnikov1995@mail.ru

Диски и лопатки компрессоров ГТД для эксплуатационных температур до 550⁰С изготавливают из титановых сплавов, несмотря на существенные их недостатки в части низких антифрикционных свойств и твердости, что может приводить к отказам, связанным с изнашиванием рабочих поверхностей [1-4]. В этой связи использование наплавленного металла в замковых пазах дисков, на бандажных полках и поверхностях замков рабочих

лопаток обеспечит более высокую эффективность использования титановых сплавов, защищенных такими покрытиями [5, 6].

В работе анализируются результаты состава, структуры и свойств наплавленного металла на образцы сплава ВТ6 с использованием комплекса на базе волоконного генератора ЛС-10 с защитной кабиной. С помощью спектрометра INCA X-Max выявлено изменение состава в металле наплавки. От поверхности образца в глубину (к подложке до ЗТВ) оно составляет: Ti от 9 до 85%, Ni от 63 до 0,1%, Al от 1,3 до 5,9%, V от 0,2 до 4%, Cr от 7,2 до 0%, Fe от 3,1 до 0,1%, C от 13 до 3%, Si от 2,7 до 0,1%. Литая структура наплавленного металла - аустенитно-карбидная. Расплавление металла подложки основного сплава ВТ6 не выявлено. Импульсной лазерной наплавкой на пластину ВТ6 обеспечивается увеличение твердости металла в интервале HRC 70...80 на глубину до 560 мкм и в целом: по сплошности упрочненного слоя, адгезионной надежности, твердости и весовой отдаче перекрываются характеристики рабочих поверхностей, выполненных по альтернативным технологиям [7, 8].

Литература

1. Муратаев Ф.И., Хакимов С.Ш. Обоснование соотношений микроструктуры и свойств титановых сплавов для задач прогнозирования сопротивления усталости. // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2014 №4. С.110-114.
2. Муратаев Ф.И., Муратаев А.Ф. Исследование повреждаемости металла дисков компрессора ГТУ // ISSN 2078-6255. Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева, 2016. №4. С. 31-35.
3. Братухин А.Г., Погосян М.А., Тарасенко Л.В. Конструкционные и функциональные материалы современного авиастроения. М.: МАИ, 2007. 301с.
4. Муратаев Ф.И., Жаржаназы М.А. Обеспечение конструкционной прочности титановых сплавов по критериям предельной пластичности и сопротивления усталости // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2013. №1. С.50-54.
5. Муратаев Ф.И., Махмутянов А.Н., Муратаев Т.А. Превращения титановых сплавов в лазерном пятне при ударном упрочнении // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2020 №2.
6. Клабуков М.А., Данилов Е.В. Обоснование состава материалов и технологий рабочих поверхностей микрохирургического инструмента // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2019. №2. С. 66-73.
7. Муратаев Ф.И., Клабуков М.А. Особенности лазерного ударного упрочнения сталей и титановых сплавов // Вестник КГТУ им.А.Н. Туполева. 2012 №4. С. 82-84.
8. Murataev F.I. et al. Ranking materials technologies by limiting characteristics of heat-resistant alloys and their longevity in the problems of import substitution 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.570 012070.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛОВ С СЭНДВИЧ — СТРУКТУРОЙ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧАМ СТОМАТОЛОГИЧЕСКОГО ПРОТЕЗИРОВАНИЯ

Крузман А.Р.

Научный руководитель — к.т.н. Никитин А.Д.

МАИ, Москва

arti2199@gmail.com

Использование передовых технологий в медицине в настоящее время позволяет сканировать челюстной аппарат пациента и на основании полученных данных формировать модель протеза методами 3D печати. Однако, подобный подход, не смотря на все свои достоинства относительно трудоемкой – построение одной модели может занимать до 14 часов, что отражается на стоимости изделия. Подобные ограничения не позволяют активно внедрять персонализированный подход при протезировании широких масс потребителей. Одновременно, существуют альтернативные методы изготовления базисов протезов – это термопечать изделия из лавсана. Этот метод позволяет изготовить протез за считанные минуты. Однако, прочность такого материала оказывается ниже, чем изготовленного методом 3D печати. В качестве рабочей гипотезы предполагается, что прочностные характеристики базиса из лавсана могут быть улучшены путем армирования по краю готового изделия. В настоящей работе проводится математическое моделирование армированного базиса под действием внешних жевательных нагрузок. Проводится поиск оптимального решения.

Задача об армированном базисе решается в модельном приближении, когда протез моделируется оболочкой постоянной толщины, опертой на упругое основание.

Подразумевается, что пластичность данного упругого основания не является однородной в некоторых областях. Тогда при применении жевательной нагрузки, реакция базиса (основания) определена распределенным давлением, в области контакта небных костей с

базисом. Решается задача путем приложения различных жевательных нагрузок и оценивается по критерию Вон Мизеса.

Показано, что армирование базиса нолатеком позволяет существенно увеличить жесткость изделия и повысить его прочность. Представлены результаты оптимизации геометрических параметров армирующего слоя. Приведены практические рекомендации.

АСИМПТОТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ В СТРУКТУРНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Кувшинникова Д.А.
МГТУ им. Н. Э. Баумана
kuvshinnikovadasha@gmail.com

Теория, описывающая процесс теплопроводности в структурно-чувствительных материалах, включает в себя интегро-дифференциальные соотношения, аппроксимация которых достаточно трудоемка. В данной работе предложена асимптотическая модель теплопроводности, учитывающая пространственную нелокальность в материале. С использованием метода разложения по малому параметру, получено дифференциальное уравнение в частных производных, описывающее процесс распространения тепла в стержне из структурно-чувствительного материала. Аналитическое решение уравнения получено с помощью преобразований Лапласа. Результаты сопоставлены с численным решением исходной задачи, полученным методом конечных объемов.

Введение. С каждым годом стремительно растет интерес к материалам, полученным с использованием наноструктур. Таким материалам присущи уникальные термо-механические свойства, существенно отличающиеся от свойств монокристаллических материалов. В связи с этим развитие методов математического моделирования, позволяющих описать поведение данных материалов, является важной и приоритетной задачей. Однако стандартные методы механики сплошной среды в данном случае не применимы, так как в модели необходимо связать макроскопическое поведение тел с рядом микроструктурных процессов.

В связи с этим интерес представляет теория, в которой с одной стороны учтено наличие микроструктуры, а с другой стороны уравнения имеют вид обычных уравнений механики сплошной среды, в общем случае интегро-дифференциальных, для решения которых применимы методы механики сплошной среды. Прием распространения взглядов классической механики сплошной среды на среду с микро- и наноструктурой называют методом непрерывной аппроксимации [1, 2]. Область науки, в которой поведение материалов с микро- и наноструктурой изучают с использованием метода непрерывной аппроксимации, иногда называют обобщенной механикой сплошной среды. Ключевыми моментами в этом методе являются установление связи между характеристиками микро- (нано-) уровня и макроуровня, а также учет эффектов пространственной и временной нелокальности среды [3, 4].

Однако точные решения для задач обобщенной механики, как известно, достаточно редки. Для отыскания решений применяются либо численные методы, либо приближенные методы, либо комбинация тех и других. Исторически, численные и приближенные методы развиваются параллельно друг другу и интерес представляет сравнение полученных результатов и выявление эффективности той или иной модели при конкретной постановке задачи. Среди приближенных методов основными являются методы асимптотических разложений по малым параметрам.

Асимптотическая модель нелокальной теплопроводности. Уравнение теплопроводности, учитывающее пространственную нелокальность в одномерном случае, имеет вид [3]:

$$\rho c \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = p_1 \lambda \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} + p_2 \lambda \frac{\partial}{\partial x} \int_V \varphi(|x' - x|) \frac{\partial T(x',t)}{\partial x'} dx', \quad x \in (0, L), t > 0. \quad (1)$$

Граничные условия второго рода для уравнения (1) запишем в виде:

$$p_1 \frac{\partial T(0,t)}{\partial x} + p_2 \int_V \varphi(|x'|) \frac{\partial T(x',t)}{\partial x'} dx' = q_0(t), \quad (2)$$

$$-p_1 \frac{\partial T(L,t)}{\partial x} - p_2 \int_v \varphi(|x'-L|) \frac{\partial T(x',t)}{\partial x'} dx' = q_1(t), \quad (3)$$

где $q_0(t)$, $q_1(t)$ – заданные тепловые потоки на левом и правом конце стержня соответственно.

Начальное условие:

$$T(x,0) = T_0 = \text{const}. \quad (4)$$

Если под интеграл в уравнение (1) подставить следующее разложение в ряд

$$\frac{\partial T(x',t)}{\partial x'} = \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} (x'-x) + \frac{1}{6} \frac{\partial^3 T(x,t)}{\partial x^3} (x'-x)^2 + \dots, \quad (5)$$

то можно получить асимптотическое представление уравнения:

$$\rho c \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = p_1 \lambda \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} + \lambda \frac{p_2 \alpha}{2} \frac{\partial^4 T(x,t)}{\partial x^4}, \quad x \in (0,L), t > 0, \quad (6)$$

где

$$\alpha = \int_v (x'-x)^2 \varphi(|x'-x|) dx'. \quad (7)$$

Подставив разложение (5), в граничные условия (2) – (3), получим:

$$\lambda p_1 \frac{\partial T(0,t)}{\partial x} + \lambda \frac{p_2 \alpha_0}{2} \frac{\partial^4 T(0,t)}{\partial x^4} = q_0(t), \quad (8)$$

$$-\lambda p_1 \frac{\partial T(L,t)}{\partial x} - \lambda \frac{p_2 \alpha_1}{2} \frac{\partial^4 T(L,t)}{\partial x^4} = q_1(t), \quad (9)$$

где

$$\alpha_0 = \int_v x'^2 \varphi(|x'|) dx', \quad \alpha_1 = \int_v (x'-L)^2 \varphi(|x'-L|) dx'.$$

(10)

Аналитическое решение задачи (6) – (10) может быть получено при помощи метода малого параметра.

Представим функцию температуры в виде ряда малого параметра α :

$$T = T_0 + \alpha T_1. \quad (11)$$

Тогда уравнение (6) примет вид:

$$\rho c \frac{\partial T_0}{\partial t} + \rho c \alpha \frac{\partial T_1}{\partial t} = p_1 \lambda \frac{\partial^2 T_0}{\partial x^2} + p_1 \lambda \alpha \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \lambda \frac{p_2 \alpha}{2} \frac{\partial^4 T_0(x,t)}{\partial x^4} + \lambda \frac{p_2 \alpha^2}{2} \frac{\partial^4 T_1(x,t)}{\partial x^4}, \quad x \in (0,L) \quad (12)$$

С граничными условиями поступим аналогичным образом. Тогда граничные условия (8) – (9) примут вид:

$$\lambda p_1 \frac{\partial T_0(0,t)}{\partial x} + \lambda p_1 \alpha_0 \frac{\partial T_1(0,t)}{\partial x} + \lambda \frac{p_2 \alpha_0}{2} \frac{\partial^3 T_0(0,t)}{\partial x^3} + \lambda \frac{p_2 \alpha_0^2}{2} \frac{\partial^3 T_1(0,t)}{\partial x^3} = q_0(t), \quad (13)$$

$$-\lambda p_1 \frac{\partial T_0(L,t)}{\partial x} - \lambda p_1 \alpha_0 \frac{\partial T_1(L,t)}{\partial x} - \lambda \frac{p_2 \alpha_0}{2} \frac{\partial^3 T_0(L,t)}{\partial x^3} - \lambda \frac{p_2 \alpha_0^2}{2} \frac{\partial^3 T_1(L,t)}{\partial x^3} = q_1(t). \quad (14)$$

Далее пренебрегая слагаемыми с α^2 будем искать решение задачи (13) – (14) в виде суммы (12) двух начально-краевых задач.

Первая задача имеет вид:

$$\rho c \frac{\partial T_0}{\partial t} = p_1 \lambda \frac{\partial^2 T_0}{\partial x^2} + \lambda \frac{p_2 \alpha}{2} \frac{\partial^4 T_0(x,t)}{\partial x^4}, \quad x \in (0, L), t > 0. \quad (15)$$

С граничными условиями:

$$\lambda p_1 \frac{\partial T_0(0,t)}{\partial x} + \lambda \frac{p_2 \alpha_0}{2} \frac{\partial^3 T_0(0,t)}{\partial x^3} = 0, \quad (16)$$

$$-p_1 \frac{\partial T_0(L,t)}{\partial x} - \frac{p_2 \alpha_0}{2} \frac{\partial^3 T_0(L,t)}{\partial x^3} = 0. \quad (17)$$

Вторая задача имеет вид:

$$\rho c \frac{\partial T_1}{\partial t} = p_1 \lambda \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}, \quad x \in (0, L), t > 0. \quad (18)$$

С граничными условиями:

$$\lambda p_1 \alpha_0 \frac{\partial T_1(0,t)}{\partial x} = q_0(t), \quad (19)$$

$$-\lambda p_1 \alpha_1 \frac{\partial T_1(L,t)}{\partial x} = q_1(t). \quad (20)$$

Задача (18) – (20) представляет собой стандартное параболическое уравнение теплопроводности с граничными условиями второго рода. Ее решение может быть найдено как численно, так и аналитически. Решение задачи (15) – (17) известно. Таким образом можно получить аналитическое решение исходной задачи теплопроводности с учетом пространственной нелокальности.

Анализ полученных результатов. На рисунках 1-2 представлены результаты расчетов при различных значениях малого параметра α в разные моменты времени, характеризующие основные этапы нагрева. Видим, что с уменьшением значения малого параметра решение приближается к классическому случаю ($p_2 = 0$). Хотелось бы напомнить, что малый параметр α зависит от области влияния нелокальности.

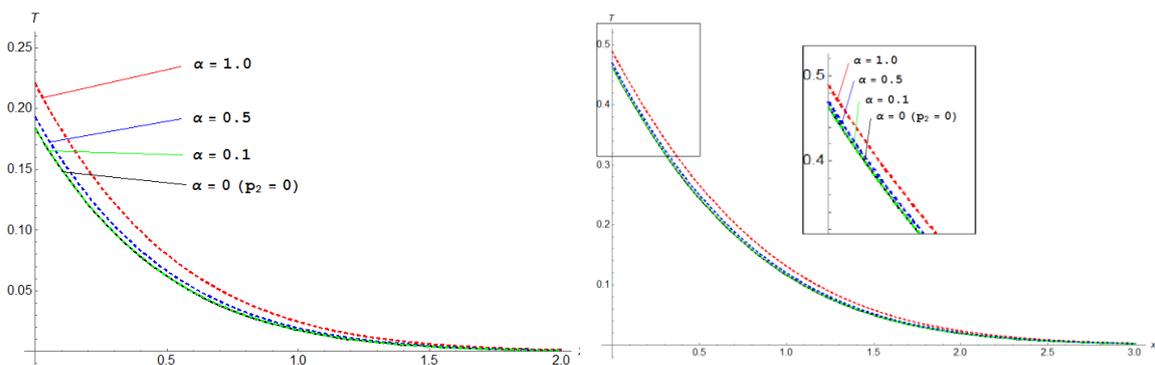


Рис 1-2. Влияние параметра α на распределение теплоты в стержне на момент времени $t = 0.5$ и $t = 1$, соответственно

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ 18-38-20108 (мол_а_вед) на лучшие научные проекты, выполняемые ведущими молодежными коллективами.

Литература

1. Андриевский Р.А., Рагуля А.В. Наноструктур-ные материалы. М.: Изд. центр. «Академия», 2005. 192 с.
2. Eringen A.C. Nonlocal continuum field theories. New York-Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2002. 393 pp.
3. Кувыркин Г.Н., Савельева И.Ю. Численное решение интегро-дифференциального уравнения теплопроводности для нелокальной среды // Математическое моделирование. 2013. Том 25. № 5. С. 99-108.
4. Кувыркин Г.Н., Журавский А.В., Савельева И.Ю. Математическое моделирование газофазного осаждения материала на криволинейную поверхность // ИФЖ. 2016. Т. 89. №6. С. 1392-1397.

РАЗВИТИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СПОСОБА ДВУХУГЛОВОЙ ГИБКИ В ШТАМПЕ С УПРУГИМИ ПЛАНКАМИ

Кузин А.О., Абрамов В.Н.

Самарский университет
alexandrkuzin88@gmail.com

Рассмотрен вариант усовершенствования способа двухугловой гибки с упругими планками, чтобы сделать более универсальную штамповую оснастку. В частности, рассмотрено влияние зазора на выталкивателе для регулирования угла наклона упругой планки и усилия прижима упругой планки. Проведено моделирование процесса, проведен анализ напряжений и деформаций в упругой планки и заготовки. Показана возможность контролирования угла пружинения высотой опускания выталкивателя.

Введение. Современные требования создания штампов диктуют необходимость создания надежных и экономичных способов, поэтому необходимо уделить внимание пусконаладочным работам. В практике листоштамповочного производства отмечается тенденция универсализации оснастки. Поскольку номенклатура П-образных изделий достаточно велика, экономически оправдано применение переналаживаемых штампов со сменными пуансонами и регулируемые матрицами. Для обеспечения компенсации пружинения подобные штампы должны иметь средства управления свободным изгибом заготовок на начальной стадии формоизменения. Развитием способа двухугловой гибки в штампе с упругими планками является вариант оснастки с зазором на выталкивателе, позволяющий контролировать угол загиба заготовки упругими планками (контролировать усилие прижима упругими планками), тем самым управляя пружинением. Также это позволяет сделать оснастку более универсальной, так как устраняет необходимость расчета и изготовления упругих планок под конкретный материал.

Рассмотрим более детально способ, рассмотренный в статьях [2,3]. Добавим на выталкивателе зазор, который показан на рисунке 1. При опускании выталкивателя с зазором на определенные расстояния, можно дожимать заготовку или наоборот не догибать. То есть, если мы не получаем требуемый угол детали, то перемещая выталкиватель с зазором вверх или вниз мы находим необходимый угол прижима упругими планками, тем самым находим необходимое усилие прижима упругими планками, получая нужную конечную деталь.

Реализация данной возможности позволит компенсировать не только пружинение, но и получить универсальную штамповую оснастку без потери заготовок на начальном этапе настройки штамповой оснастки. Для того, чтобы получить требуемый угол предположим, что зазор на выталкивателе будет равняться толщине заготовки. Если удастся задействовать резерв увеличения угла гибки при помощи оптимального размера зазора и контролируемого угла наклона упругих планок, то можно не опасаться недогиба или перегиба стенок изделия.

Методы. Для того чтобы продемонстрировать работоспособность данной идеи, был смоделирован штамп с зазорами на выталкивателе. Моделирование производилось в программе DEFORM-2D. На рисунке 1 показана геометрия объектов, участвующих в процессе деформации (количество элементов в сетке упругой планки – 1000, заготовки – 2000). На рисунке 1 показана половина штампа так как штамп симметричен. В задаче моделируется плоско-деформированное состояние. Модель матрицы, выталкивателя, пуансона – жёсткая, планки – упругая, заготовки – упруго – пластическая. Размеры штамповой оснастки берутся исходя из геометрических размеров заготовки.

Рассмотрим возможность влияния на упругое пружинение перемещением выталкивателя с зазором на различные значения. Моделирование данного процесса проводилось до середины (1000 шаг) и чуть ниже середины (1500 шаг) и полный ход пуансона (1981 шаг).

Для оценки условий процесса обратного хода рассматриваются поля распределений напряжений и деформаций по объёму планки по окончании деформации. Окончание обратного хода показано на рисунке 2, 3 и 4.

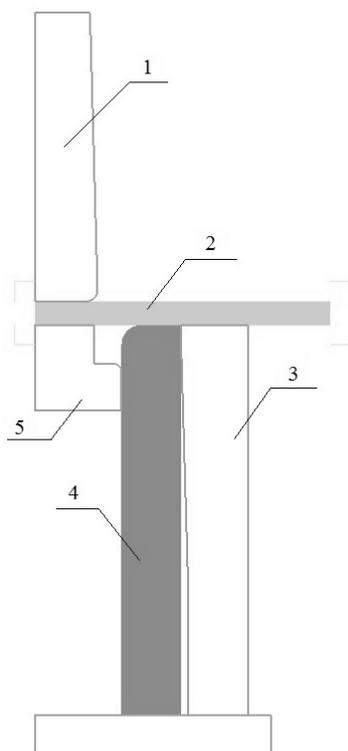


Рис. 1. Штамповая оснастка с упругими планками и пазами на выталкивателе, где 1 – пуансон, 2 – заготовка, 3 – матрица, 4 – упругая планка, 5 – выталкиватель с зазором.

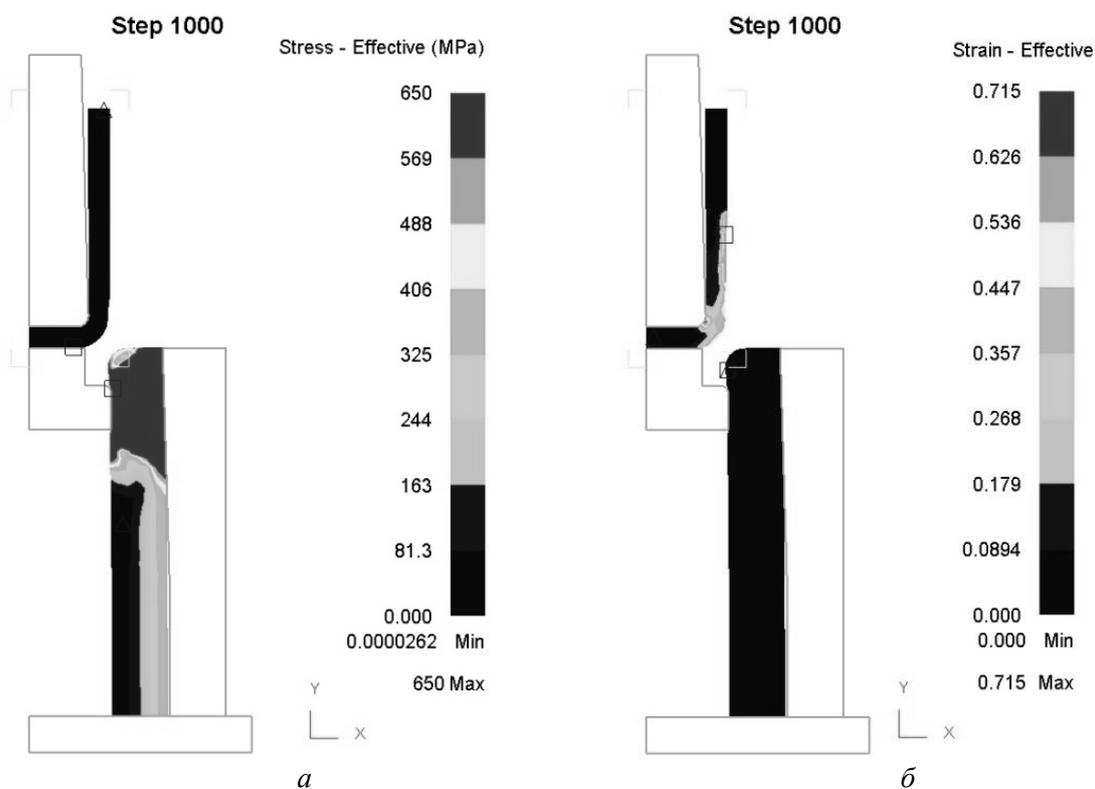


Рис.2. Поля распределения напряжений (*a*) и деформаций (*б*) по толщине заготовки и упругой планки по окончании деформации обратного хода.

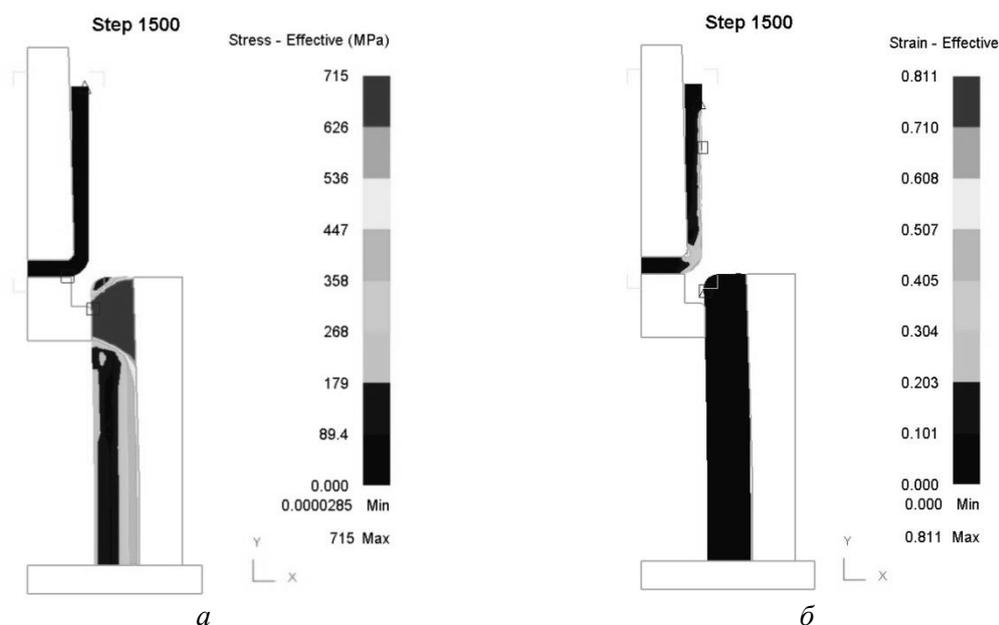


Рис.3. Поля распределения напряжений (а) и деформаций (б) по толщине заготовки и упругой планки по окончании деформации обратного хода.

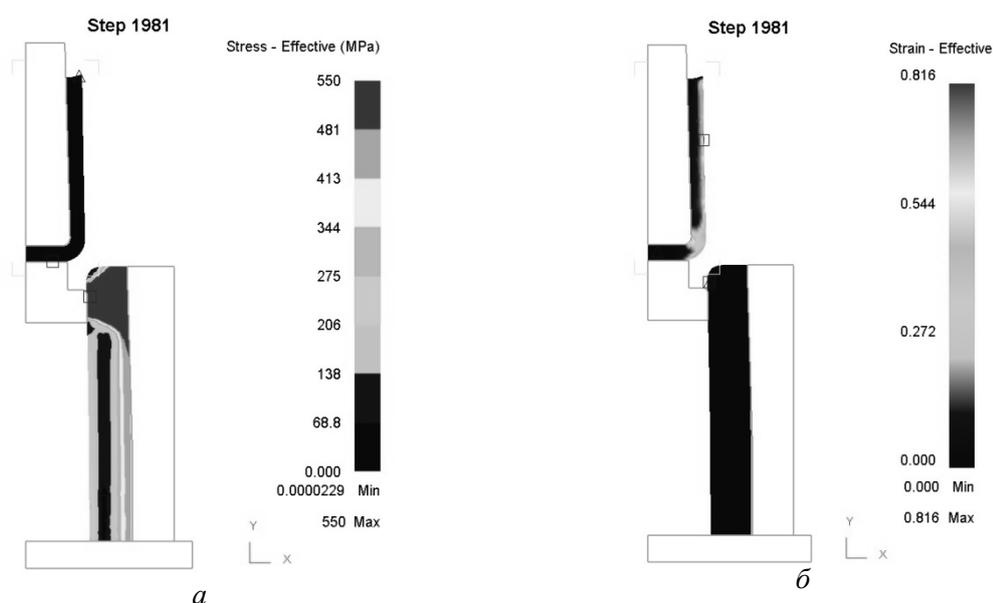


Рис. 4. Поля распределения напряжений (а) и деформаций (б) по толщине заготовки и упругой планки по окончании деформации.

Рассматривая полученный угол после моделирования можно сказать, что во всех трех случаях он различен, тем самым мы подтверждаем гипотезу о том, что выталкивателем с зазором можно изменять усилие прижима упругой планки заготовки, а также менять угол на выходе из штамповой оснастки.

Литература

1. Кузин, А.О. Исследование упругих свойств штамповой оснастки при операции двухугловой гибки в штампе с упругой планкой / Кузин А.О., Попов И.П., Нестеренко Е.С. // Заготовительное производство в машиностроении – 2013. - № 4. - С. 20-23.
2. Кузин, А.О. Моделирование операции двухугловой гибки в штампе с упругим элементом / Кузин А.О., Попов И.П., Нестеренко Е.С. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук –2016 - Т. 18. № 4. - С. 25-30.

МОДЕЛЬ ОТСЛОЕНИЯ ТОНКОГО ПОКРЫТИЯ (БАЛОЧНОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ) ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КЛЕЕВ С БОЛЬШОЙ ПРЕДЕЛЬНОЙ ВЫТЯЖКОЙ

Куксин Д.Г.

Научный руководитель — профессор, д.ф.-м.н. Беклемишев Н.Н.

МАИ, Москва

dmitrykuksin@gmail.com

Разрушение многослойных элементов конструкции с тонкими покрытиями в основном определяются возникновением и развитием трещин на границы соединений. Моделирование адгезионной прочности – актуальная проблема механики разрушения. Значительное развитие получили балочные модели, обеспечивающие достаточно глубокое понимание процессов адгезионного разрушения. И возможность оценки сопутствующих механических эффектов. Полученные при этом результаты могут иметь практическое применение для оценок параметров различных технологических процессов.

Значительный вклад в развитие балочных моделей внесён отечественными учёными [1-4].

В данной работе рассматривают балочное приближение в моделировании процесса сопротивления адгезионному разрушению при отслоении тонкого покрытия. Представительный элемент покрытия в концевой зоне (размер концевой зоны отслоения превышает толщину покрытия) замещён эффективной балкой единичной ширины, нагруженной системой связи внутри концевой зоны. Внешние нагрузки представлены в виде продольной силы и сосредоточенного изгибающего момента, приложенного к свободному концу. Принято условие равенства нулю удельной энергии диссипации в концевой зоне отслоения, рассматриваемой как эффективная трещина, внешние нагрузки в которой скомпенсированы силами сцепления.

Рассмотрена задача об отслоении покрытия в случае, когда связь с покрытием ассоциируется с моделью концевой области типа Дагдейла.

Литература

1. Ентов В.Н., Салганик Р.Л. О балочном приближении в теории трещин. Известия АН СССР. Механика. 1965г. №5. С.95-102.
2. Гольдштейн Р.В., Коновалов Р.Б. Асимптотический анализ пространственной задачи о трещине-расслоении в двухслойной пластине. Известия РАН МТТ. 1996. №3. С. 62-71.
3. Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М. Балочное приближение в задачах отслоения тонких покрытий. Известия РАН МТТ. 2003г. №5. С. 154-163.
4. Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М. Отслоение покрытий под действием термоупругих напряжений (балочное приближение). Вестник СамГУ- Естественная наука. 2007г. №4. С. 66-83.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ШТАМПОВКИ ПОЛОЙ ДЕТАЛИ

Ларкин А.С.

Научный руководитель — профессор, к.т.н. Шпунькин Н.Ф.

Московский Политех, Сергиев Посад

andy.cool@mail.ru

В работе проведено исследование различных методов изготовления полой детали с высокой цилиндрической стенкой и отверстием в донной части из алюминиевого сплава Д16. По действующему технологическому процессу деталь изготавливается методом холодной объёмной штамповки из цилиндрической заготовки диаметром 16 мм и высотой 29 мм. Основной формоизменяющей операцией в этой технологии является обратное выдавливание, в качестве доделочных применяются операции механической обработки: сверление отверстия в дне, подрезка торца и др. На основе проведённого компьютерного моделирования удалось оптимизировать процесс холодной объёмной штамповки, однако наличие в технологическом процессе операций механической обработки не позволило обеспечить повышение производительности при изготовлении детали.

В связи с увеличением программы выпуска изделий возникла необходимость рассмотреть другие варианты технологического процесса штамповки. Была изучена и обоснована

возможность изготовления детали методом листовой штамповки с применением многооперационной вытяжки. Вытяжка является одной из самых распространенных и, в то же время, сложных операций листовой штамповки. За время развития обработки материалов давлением было проведено много исследовательских работ, в которых были получены математические зависимости различных величин, необходимых для расчета параметров вытяжки. В то же время развитие компьютерных технологий позволило быстрее, точнее и эффективнее оценивать параметры данной технологической операции за счёт компьютерного моделирования. В ходе данной работы было проведено сопоставление теоретического расчета вытяжки с компьютерным моделированием данного процесса в среде Autoform.

Исходными данными являлись размеры окончательной полой детали, толщина и свойства исходного листового материала. На их основании был произведён расчёт размеров заготовки, а также количество переходов вытяжки в соответствии со значениями предельных коэффициентов вытяжки. Были определены размеры детали на каждом переходе, а также проведено сопоставление полученных размеров детали с исходными размерами. Компьютерное моделирование фактически должно подтвердить или опровергнуть данные теоретического расчета, а также помочь оптимизировать процесс и уточнить оптимальные геометрические размеры инструментов. Исходя из требуемых форм полуфабрикатов детали на каждом переходе, были построены матрицы и пуансоны соответствующей конфигурации с использованием программ трёхмерного геометрического моделирования. После импорта конфигураций инструмента в систему Autoform матрицам и пуансонам были назначены соответствующие номера операций, задана последовательность выполнения операций, выполнено позиционирование инструментов для каждой отдельной операции и проведено моделирование. Возможность изготовления детали с применением разработанного технологического процесса при компьютерном моделировании оценивалась по диаграмме предельных деформаций, которая для применяемого листового материала устанавливает связь между компонентами главных деформаций в момент разрушения. Свидетельством успешного моделирования является деталь, полученная без серьезных дефектов, у которой точки с соответствующими значениями главных деформаций не расположены в зонах разрушения или складкообразования на диаграмме предельных деформаций.

В результате моделирования получена деталь, соответствующая требуемой, что говорит о том, что современные программные комплексы (Autoform, в частности) способны ускорить и оптимизировать технологические процессы в обработке материалов давлением. Разработанная технология может быть реализована на высокопроизводительном оборудовании – листоштамповочном многопозиционном прессе-автомате. В работе приведены рекомендации по адаптации технологического процесса к этому виду оборудования.

Литература

1. Ковка и штамповка: Справочник: В 4-х томах. Т. 4. Листовая штамповка/ А. Ю. Аверкиев, С. И. Вдовин, Н. Ф. Шпунькин и др. Под ред. С. С. Яковлева. М.: Машиностроение, 2010. – 732 с.
2. Головин В.А., Ракошиц Г.С., Навроцкий А.Г. Технология и оборудование холодной штамповки. М.: Машиностроение, 1987. - 352 с.
3. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке.– 6-е изд., перераб. и доп.–Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979.– 520с.
4. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. Учебник для вузов. Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1977. – 423с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТРУЕФОРМИРУЮЩЕГО ТРАКТА МОБИЛЬНЫХ ГИДРОАБРАЗИВНЫХ УСТАНОВОК

Лихачев А.С., Илюхина А.А.

Научный руководитель — доцент, к.т.н. Колпаков В.И.
МГТУ, Москва
lixacheow.alexei@yandex.ru

Развитие технологий с применением высокоскоростной струи жидкости предусматривает разработку технологии, позволяющей проводить резку под водой как различных материалов, так и техногенно опасных объектов. Использование при выполнении подобных операций уже имеющихся технологий, например, таких как лазерная, плазменная, газовая и электрическая резки, приводят к выделению большого количества тепла, что может повлечь за собой негативные последствия. Применение же технологии гидроабразивной резки (ГАР) позволяет значительно снизить и практически избежать нагрева обрабатываемого материала. Поэтому адаптация ГАР к подводным условиям работы позволит реализовать не только технологию резки, но и решить задачи обслуживания техногенно опасных объектов [1-3].

В настоящей работе предложен способ увеличения эффективности работы гидроабразивных установок в подводных условиях за счёт использования составного струеформирующего тракта, позволяющего не только лимитировать расход гидроабразивной суспензии, но и стабилизировать высокоскоростное струйное течение.

Обоснование конструктивных параметров велось с использованием разработанной методики, базирующейся на численных методах механики сплошной среды [4,5]. При этом рассматривались задачи формирования гидроабразивной струи и её последующее взаимодействие с металлическими конструкциями из различных материалов.

Литература

1. Puykhina A.A., Kolpakov V.I., Galinovskii A.L., Khakhalin, A.V. The Features of Hydroabrasive Cutting of Honeycomb Panels of Space Vehicles. Moscow University Physics Bulletin. 2018. Vol.73 (4). Pp.441-446. DOI: 10.3103/S0027134918040069
2. Илюхина А.А., Колпаков В.И., Галиновский А.Л., Хахалин А.В. Особенности процесса гидроабразивной резки сотовых панелей космических аппаратов. Вестник московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2018, №4, с. 101-107
3. Колпаков В.И., Илюхина А.А. Особенности математического моделирования разрушения конструкций из разных материалов под действием высокоскоростной гидроабразивной струи. Инженерный журнал: наука и инновация, 2019, №9, с.1-8. DOI: 10.18698/2308-6033-2019-9-1913
URL: <http://www.engjournal.ru/articles/1913/1913.pdf> (дата обращения 22.01.2020)
4. Герасимова, А. М., Ефимова, С. А., Прохорова, А. В., Колпаков, В. И. (2014). Особенности физико-математической постановки и численного решения типовых задач гидроабразивной резки различных материалов. Инженерный вестник, (1), 3-3.
5. Герасимова, А. М., Галиновский, А. Л., Колпаков, В. И. (2015). Анализ взаимодействия гидроабразивной струи с внутренней поверхностью канала фокусирующего сопла. Известия высших учебных заведений. Машиностроение, (9 (666)).

УПРУГИЕ СВОЙСТВА ДВУХСЛОЙНЫХ НАНОТРУБОК ИЗ ГЕКСАГОНАЛЬНЫХ КРИСТАЛЛОВ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

Лобакова А.О.

Научный руководитель — д.ф.-м.н. Лисовенко Д.С.
МАИ, Москва
lina.lobakova98@mail.ru

В современной механике важное место занимает синтез наноматериалов. В конце 20-го века, в 1985 году, был открыт фуллерен (C₆₀) группой ученых: Ричардом Смолли, Робертом Кёрла и Харольдом Уолтером Крото. Фуллерен представляет собой молекулу сферической формы, поверхность которого состоит из шестидесяти атомов углерода в вершинах шестиугольников и пятиугольников. Еще один класс углеродных наноструктур включает углеродные нанотрубки (УНТ) – объекты, составленные из одного или нескольких,

свернутых в цилиндр гексагональных графеновых слоев. В 90-х годах также были получены неуглеродные нанотрубки из кристаллов различных кристаллических систем.

Применение УНТ обширно из-за их уникальных свойств. Нанотрубки улучшают механические свойства при внедрении их в композитные полимеры, т.к. обладают высокой прочностью при растяжении и изгибе. Напряженность электрического поля в окрестности головки УНТ на порядки превышает среднюю напряженность по объему, что ведет к созданию нового класса электронных приборов с низким напряжением питания и малыми размерами. Расстояния между графитовыми слоями в многослойной углеродной нанотрубке достаточно для размещения некоторого количества вещества, в результате УНТ рассматривают как уникальную емкость.

В данной работе рассмотрено упругое растяжение двухслойных нанотрубок из гексагональных кристаллов. Для описания механических свойств будет использоваться модель полого стержня, обладающего цилиндрической гексагональной анизотропией. Исходя из этого представления, записан закон Гука в цилиндрической системе координат, уравнения равновесия при условии зависимости компонент напряжения от одной координаты и граничных условий на боковых поверхностях и торцах. С помощью численно-аналитического анализа исследована изменчивость упругих характеристик двухслойных нанотрубок из гексагональных кристаллов.

Литература

1. Елецкий. А. В. Углеродные нанотрубки и их эмиссионные свойства. УФН, 2002, т. 172, № 4.
2. Лозовик Ю.Е., Попов А.М. Свойства и нанотехнологические применения нанотрубок. УФН, 2007, Т. 177, № 7.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НДС В СИСТЕМЕ ПОДЛОЖКА-ПОКРЫТИЕ

Мананникова А.И.

Научный руководитель — к.т.н. Астапов А.Н.

МАИ, Москва

alisa.manannikova98@gmail.com

Настоящая работа является продолжением исследований, посвященных разработкам жаростойких защитных покрытий [1, 2], а также созданию и развитию математических моделей и методов [2-5] оценки уровня и области локализации температурных напряжений, возникающих в процессе получения и/или эксплуатации покрытий.

Рассматривается задача термоупругости для многослойной системы «подложка – покрытие» при равномерном нагреве/охлаждении в постановке плоского напряженного состояния. Система моделируется тонкой неоднородной по толщине пластиной, свободной от внешних сил и закреплений. Физические соотношения, связывающие возникающие напряжения и деформации, описываются законом Гука-Дюамеля.

Построение математической модели осуществлялось после анализа аналогичных работ [3-5], которые в свою очередь содержат ряд недостатков (не учитывают изгибные деформации [3, 4], оценивают напряжения лишь на поверхности подложки [4], подходят для расчета неоднородных пластин, слои которых симметричны относительно срединной поверхности [3], имеют громоздкие неочевидные определяющие соотношения [5]) и в полной мере не отражают реальный характер распределения напряжений по толщине многослойной системы. Получено аналитическое решение для тангенциальных напряжений в пластине, учитывающее одновременный вклад чисто тепловых деформаций, деформаций теплового растяжения-сжатия и изгиба. Решение позволяет оценивать напряженно-деформированное состояние (НДС) системы для произвольного числа слоев различной толщины, выполненных из разных материалов.

Проведена апробация полученной аналитической модели на примере исследования НДС в системе «жаропрочный материал – жаростойкое покрытие». В качестве подложки рассмотрен ряд сплавов на основе тугоплавких металлов (молибдена и вольфрама), в качестве защитных покрытий – однослойные и многослойные композиции на основе силикатов иттербия ($Yb_2Si_2O_7$ и Yb_2SiO_5). Данные материалы и покрытия имеют высокие перспективы применения в газотурбинных двигателях шестого поколения. Показано, что

учет изгиба приводит к существенному изменению уровня и характера распределения тепловых напряжений по толщине системы. Полученные оценки позволяют проводить анализ на совместимость материалов слоев по термоупругим характеристикам и при необходимости выполнять модификацию композиций путем замены и/или введения дополнительного слоя или изменения их толщин.

Работа выполнена в рамках гранта РНФ по мероприятию «Проведение исследований научными группами под руководством молодых ученых» Президентской программы исследовательских проектов (Соглашение № 19-79-10258 от 08.08.2019 г.).

Литература

1. Мананникова А.И., Астапов А.Н. Поиск перспективных направлений повышения рабочих температур жаростойких покрытий силицидного типа // Сборник тезисов докладов XLV Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения – 2019». Москва, 16 – 19 апреля 2019 г. – М.: МАИ, 2019. – С. 856 – 857.
2. Астапов А.Н., Жаворонок С.И. Расчет тепловых напряжений в системе «подложка – покрытие» и пути их снижения // Материалы XXIII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. – Калужская обл., г. Кремёнки, санаторий «Вятчи», 13 – 17 февраля 2017 г. – Т. 1. – М.: ООО «ТРИ», 2017. – С. 14 – 16.
3. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости: Пер. с англ. // Под ред. Г.С. Шапиро. – М.: Наука, 1979. – 560 с.
4. Будиновский С.А., Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Применение аналитической модели определения упругих напряжений в многослойной системе при решении задач по созданию высокотемпературных жаростойких покрытий для рабочих лопаток авиационных турбин // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. – 2011, № SP2. – С. 26 – 37.
5. Барвинок В.А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий. – М.: Машиностроение, 1990. – 384 с.

СОГЛАСОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУКТУРЫ И КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВАРИАНТОВ СПЛАВА ВТ22

Махмутянов А.Н., Муратаев Т.А., Колесников Д.Н.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Муратаев Ф.И.
КНИТУ-КАИ, Казань
arturudmnet@gmail.com

При изготовлении дисков компрессора ГТД широко используются титановые сплавы мартенситного и переходного классов. Они обеспечивают достаточную работоспособность до уровней температур 500...550^oC в условиях комбинированного воздействия растяжения – сжатия в сочетании с изгибом [1-3]. Причем в ободной части и ступице дисков возникают условия сложного НДС [4-7]. В высоконапорных ступенях двигателей возникает необходимость проработки массивных участков металла диска при ковке и штамповке, чему отвечает титановый сплав переходного класса ВТ22 [8, 9].

При комплексном исследовании сплава его структуры и свойств, работе используются фрагменты металла диска компрессора 1-ой ступени КВД, изготовленного из поковки, а также штамповки 3-х, 5-ти и 8-ми переходной проработки в области β , а затем $\alpha+\beta$ – области проработки с последующей термической обработкой. Структура состоит (рис.1, рис.2) из низкотемпературной с разной степенью рекристаллизации α -фазы + высокодисперсной (превращенной) α_n -фазы + превращенного α^1 -мартенсита + α^{11} -мартенсита и + превращенной β^1 -фазы разной дисперсности.

Эффективность улучшения конструкционной прочности (КП) определяется морфологией фаз и концентрацией составляющих структуры. Установлены устойчивые зависимости $\psi=f(\alpha/\alpha_n)$, на «модуль Ильюшина» - $E_k=f(\alpha/\alpha_n)$ и коэффициент деформационного упрочнения - $m^{(0)}=f(\alpha/\alpha_n)$, подтвержденные коэффициентами регрессии соответственно: $R^2 = 0,9891$, $R^2 = 0,9969$ и $R^2 = 0,9542$. Полученные результаты обеспечили улучшение характеристик конструкционной прочности сплава ВТ22 в разы на основе обоснования 8-ми переходной технологии штамповки дисков изделия.

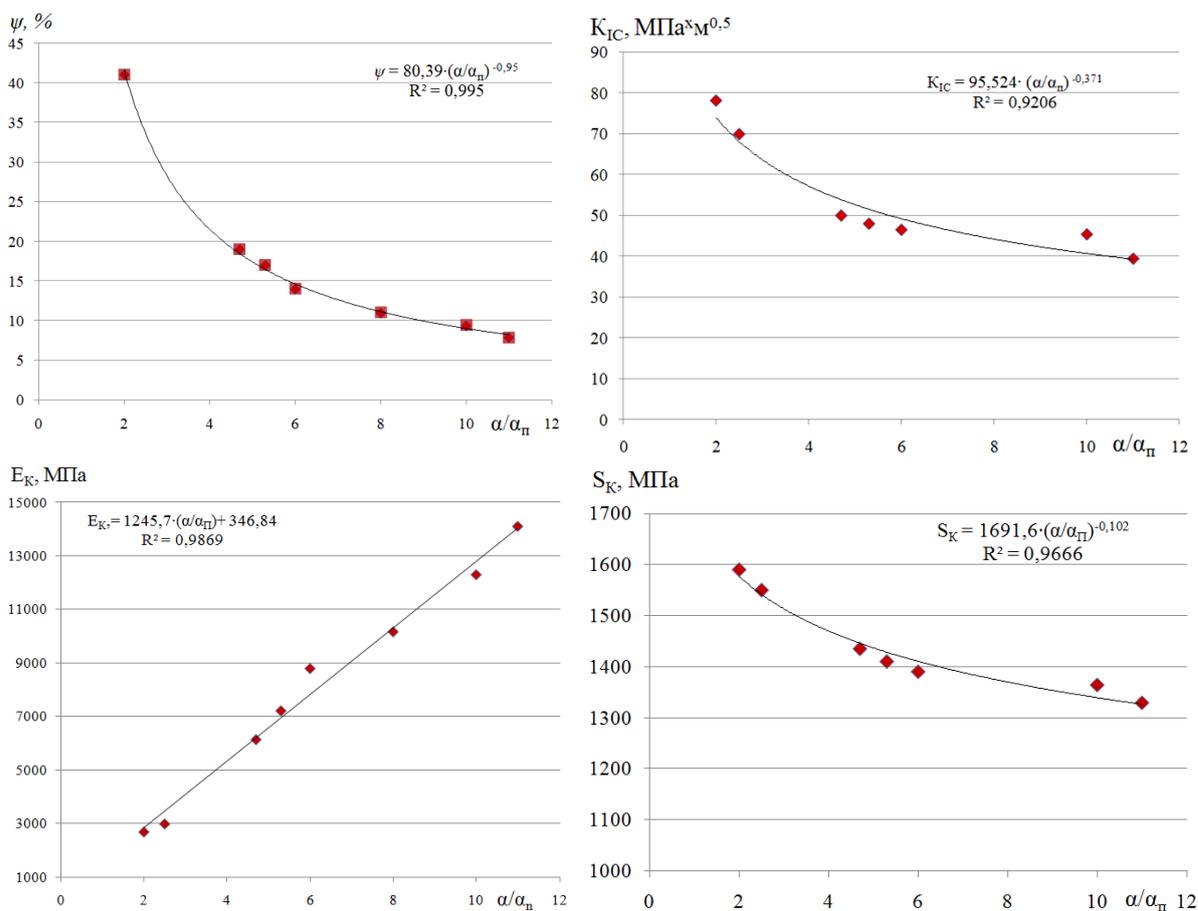


Рис.1. Влияние соотношения фаз α/α_{π} на характеристики конструкционной прочности.

Таблица. Характеристики структуры и свойств сплавов ВТ6 и ВТ22 по технологическим вариантам заготовок и термической обработки (мягкой - жесткой закалки и старения).

Характеристика структуры или показатель свойств	Штамповки в 8 переходов		Штамповки в 5 переходов			Диск поковки а	Штамповки в 3 перехода	
	2	2,5	4,7	5,7	6		10	11
α/α_{π}	2	2,5	4,7	5,7	6	8	10	11
ψ , %	43	41	19,6	17	14	10	9.4	7.9
K_{IC} , $MPa \cdot m^{0.5}$ - критическая интенсивность напряжений	78	70	50	48	46.5	-	45.4	39.4
S_K – сопротивление отрыву, в МПа	1590	1550	1435	1410	1390	-	1364	1329
E_K – конечный модуль Ильюшина, в МПа	2700	3000	6147	7220	8800	10170	12300	14100

Литература

16. Муратаев Ф.И., Жаржаназы М.А. Обеспечение конструкционной прочности титановых сплавов по критериям предельной пластичности и сопротивления усталости // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева, 2013. №1. С.50-54.
17. Муратаев Ф.И., Муратаев А.Ф. Исследование повреждаемости металла дисков компрессора ГТУ // ISSN 2078-6255. Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева 2016 №4. С. 31-35.
18. А.Г. Братухин, М.А. Погосян, Л.В. Тарасенко. Конструкционные и функциональные материалы современного авиастроения. М.: МАИ, 2007. 301с.
19. Муратаев Ф.И., Хакимов С.Ш. Обоснование соотношений микроструктуры и свойств титановых сплавов для задач прогнозирования сопротивления усталости. // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева 2014 №4. С.110-114.
20. F I Murataev et al Ranking materials technologies by limiting characteristics of heat-resistant alloys and their longevity in the problems of import substitution 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.570 012070.

21. Муратаев Ф.И., Махмутянов А.Н., Муратаев Т.А. Превращения титановых сплавов в лазерном пятне при ударном упрочнении // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева 2020 №2.
22. Муратаев Ф.И., Мухаммадеев И.М. Закономерности структурных состояний и характеристик конструкционной прочности штамповок титанового сплава // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева 2020 №2.
23. F I Murataev et al 2019 IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering 570 012071.
24. Муратаев Ф.И., Шканов И. Н. Обоснование технологии обработки дисков компрессоров по характеристикам статического и циклического деформирования // Известия вузов «Авиационная техника», 1999, № 1. С. 43-47.

АПРИОРНАЯ ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ВЫЧИСЛЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ФЕРМ

Махова В.С.

Научный руководитель — доцент, д.т.н. Лебедев В.В.

МГСУ, Королёв

makhovavika@icloud.com

Тема исследования появилась после выполнения индивидуального домашнего задания по теоретической механике. В этом задании нужно было определить усилия в стержнях заданной фермы. Ферма предлагалась статически определимая. Правильность вычислений можно было проверить самостоятельно. Однако на заключительном этапе, при расчёте последнего узла фермы условия правильности вычислений, как правило, не выполнялись. В одних вариантах абсолютная и относительная ошибки были незначительными, а в других достигали существенных значений. Например, относительная ошибка определения усилия в последнем изучаемом стержне иногда превышала 100%. Появилась задача - оценить точность вычислений. Для этого потребовалось разобрать методическую схему решения задачи.

На первом этапе выполнения задания нужно было проверить выполнение условия статической определимости фермы. Это следствие из формулы П.Л.Чебышева. Шарнирно-рычажная система должна иметь нулевую степень свободы. Если число степеней свободы будет положительным, то вместо фермы будет подвижный механизм. При отрицательном числе степеней свободы ферма становится статически неопределимой и переходит из области теоретической механики и сопротивления материалов в область строительной механики. Во всех вариантах были две опоры – цилиндрический шарнир с двумя составляющими реакции опоры и каток с одной составляющей силы реакции. Для контроля правильности определения сил реакций опор было выдвинуто требование применить три формы условия равновесия плоской системы сил, а затем самостоятельно проверить совпадение трёх полученных результатов.

После определения реакций опор началось последовательное изучение узлов фермы – это третий, заключительный этап выполнения задания. Узлы фермы надо изучать в такой последовательности, чтобы в очередном исследуемом узле сходилась не более двух изучаемых стержней, усилия в которых пока не определены. Это связано с тем, что условие равновесия плоской системы сходящихся сил имеет два уравнения

Дополнительно к заданию была исследована простейшая треугольная ферма с тремя шарнирами и тремя стержнями. На втором, предпоследнем узле была выполнена частичная проверка полученных усилий в стержнях. Одно из двух уравнений системы должно обязательно превратиться в тождество.

Исследуя последний узел, выполняется полная проверка. Однако тождества получаются, если пользоваться точными значениями полученных ранее усилий и тригонометрических функций. Если пользоваться приближёнными значениями сил и тригонометрических функций, то появится невязка, ошибка во время выполнения проверок. Насколько можно округлять точные значения? Это основной вопрос исследования в проведённой работе.

Пример – все значения округляем до одного десятичного знака после запятой. Реакции опор (шарнира и катка) выражаются точными числами относительно активной силы. Усилия в стержнях выражаются приближёнными числами. При изучении предпоследнего узла во время частичной проверки результата появляется невязка. Была оценена абсолютная и относительная ошибка.

При изучении последнего узла фермы, условия системы уравнений в общем случае будут выполняться приближённо. В рассмотренном примере одно условие выполняется точно, а второе приближённо - такая ситуация тоже может иметь место.

Вывод по расчёту простейшей треугольной фермы.

Если пользоваться приближёнными значениями с одним десятичным знаком после запятой, то методическая ошибка будет равна 0,04 (4%). Проведено обобщение ошибок, получающихся при различных округлениях чисел в процессе решения задачи. Общая ошибка зависит от числа треугольников, как устойчивых фигур, в конструкции фермы.

В реальном задании относительная ошибка оказалась равной 12%, потому что в конструкции фермы было 5 треугольников, а промежуточные значения округлялись до десятых или сотых долей. Это означает, что относительная ошибка была заранее предсказуема и составляла от 3% до 23%.

Малые относительные ошибки получились в тех вариантах, кто пользовался округлениями до 4-6 знаков после запятой.

Вывод. Сотые и даже тысячные доли в значениях тригонометрических функций могут привести к существенной ошибке в конечном результате. Чтобы избежать больших невязок, надо пользоваться более точными приближениями, как в четырёхзначных таблицах Брадиса, а лучше, в шестизначных, но конечно, теперь уже с применением компьютерной техники.

АДГЕЗИОННЫЙ КОНТАКТ СМОЧЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Маховская Ю.Ю., Рогожева А.М.

ИПМех РАН, Москва,

МФТИ, Москва

Makhovskaya@mail.ru, Rogozheva.AM@phystech.edu

Поверхности, контактирующие во влажной атмосфере, обычно покрыты слоями адсорбированных молекул жидкости, которые оказывают значительное влияние на адгезионное взаимодействие этих поверхностей. Построена модель взаимодействия жесткого выступа с упругим полупространством при действии в зазоре между контактирующими телами капиллярных и молекулярных (ван-дер-ваальсовых) сил адгезии. Изучена зависимость силы адгезионного притяжения между поверхностями и размера образующегося мениска от расстояния между поверхностями при различных значениях относительной влажности окружающего воздуха, поверхностных свойств взаимодействующих тел, их геометрических и механических характеристик. Показано, что сила адгезии возрастает при увеличении влажности окружающей атмосферы.

Введение. Сила адгезионного притяжения поверхностей, покрытых пленками жидкости, складывается из нескольких составляющих, из которых можно выделить капиллярное давление в менисках (жидких «мостиках», стягивающих поверхности) и силы ван-дер-ваальсового межмолекулярного притяжения [1,2]. Обычно влияние на контактные характеристики для упругих тел исследуется отдельно для капиллярных [3,4] и межмолекулярных сил [5,6]. В настоящей работе моделируется эффект одновременного действия этих сил на характеристики осесимметричного упругого контакта.

Капиллярная адгезия. Рассматривается взаимодействие выступа параболической формы с плоской гладкой поверхностью упругого полупространства. Поверхности разделены водяным мениском (рис. 1).

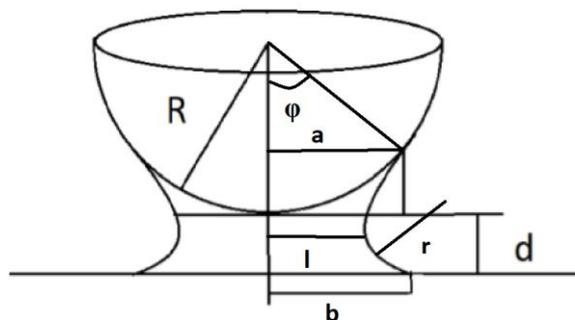


Рис.1. Схема взаимодействия выступа, мениска и полупространства.

Учтены две составляющих силы капиллярного притяжения между выступом и полупространством. Первая составляющая - это сила, связанная с поверхностным натяжением пленки жидкости на внешней границе мениска

$$F_t = 2\pi a \sigma \cos(\theta)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения воды, θ – угол смачивания водой поверхностей взаимодействующих твердых тел. Вторая составляющая – это сила, вызванная действием лапласовского давления в жидкости

$$F_l = \Delta p \pi b^2$$

где Δp - разница давлений по обе стороны от искривленной поверхности мениска. Для мениска, находящегося в термодинамическом равновесии с окружающей атмосферой эту разницу давлений можно определить по формуле Кельвина

$$\Delta p = -RTV_m \ln \frac{p}{p_s}$$

Здесь R – радиус параболической поверхности выступа, $\frac{p}{p_s}$ – влажность воздуха, окружающего мениск, V_m – молярный объем воды. Капиллярное давление связано с геометрией мениска формулой Лапласа

$$\Delta p = \sigma \left(\frac{1}{l} - \frac{1}{r} \right)$$

где l и r - радиусы кривизны мениска в двух взаимно перпендикулярных направлениях (см. рис. 1). В качестве условия существования мениска применяется геометрическое условие:

$$\frac{b}{1 - \sin(\theta)} \leq r$$

Молекулярная адгезия. Между поверхностями действует также сила адгезионного притяжения, обусловленная межмолекулярным ван-дер-ваальсовым взаимодействием. Молекулярное притяжение поверхностей твердых тел через водную среду моделируется потенциалом Леннарда-Джонса, который учитывает как притяжение поверхностей при относительно большой толщине разделяющего их слоя жидкости, так и их отталкивание при малой толщине слоя. Удельная сила адгезионного взаимодействия определяется в этом случае соотношением:

$$p_a(h(r)) = -\frac{A_1}{h^3(r)} + \frac{A_2}{h^9(r)}$$

где $h(r)$ - величина зазора между взаимодействующими поверхностями. Сила адгезионного межмолекулярного взаимодействия может быть найдена по формуле:

$$F_m = \int_0^{\infty} 2\pi r p_a(h(r)) dr$$

Полная сила адгезионного взаимодействия между полупространством и выступом рассчитывается как сумма трех вкладов:

$$F = F_t + F_l + F_m$$

и исследуется в зависимости от расстояния между ними d .

Учет упругих деформаций. Для описания упругих свойств взаимодействующих тел в адгезионном контакте используется приближение Дерягина-Муллера-Топорова (ДМТ), согласно которому адгезионные силы не влияют на напряженно-деформированное состояние взаимодействующих тел [7]. Это приближение применимо для достаточно жестких тел, имеющих относительно малые радиусы кривизны контактирующих поверхностей.

В результате выводятся соотношения, позволяющие исследовать зависимости силы адгезионного притяжения между поверхностями и размера образующегося мениска от

расстояния между поверхностями при различных значениях относительной влажности окружающего воздуха, поверхностных свойств взаимодействующих тел (в частности, угла смачивания жидкостью твердых поверхностей), их геометрических и механических характеристик. Показано, в частности, что сила адгезии возрастает при увеличении относительной влажности воздуха.

Полученные результаты могут применяться для моделирования взаимодействия зонда атомно-силового микроскопа с образцом во влажной атмосфере, а также для описания контактного взаимодействия шероховатых поверхностей, покрытых пленками жидкости.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 20-01-00400 а).

Литература

1. Дерягин Б. В., Чураев Н. В., Муллер В. М. Поверхностные силы. — М.: Наука. — 1985
2. Israelachvili J. Intermolecular and Surface Forces. New York: Academic. 1992.
3. Maugis D., Gauthier-Manuel B. JKR-DMT transition in the presence of a liquid meniscus // J. Adhesion Sci. Technol. 1994. V. 8. N. 11. P. 1311-1322.
4. Горячева И.Г., Маховская Ю.Ю. Контактное взаимодействие упругих тел при наличии капиллярной адгезии // ПММ. 1999. Т. 63. Вып. 1. С. 128-137.
5. Солдатенков И.А. (2012) Применение метода последовательных приближений к расчету упругого контакта при наличии молекулярной адгезии // ПММ, Т. 76, Вып. 5, С. 734-743.
6. Маховская Ю.Ю. Моделирование взаимодействия индентора с упругим полупространством при наличии адгезионного притяжения произвольного вида // Трение и износ, 2016, том 37, № 4.
7. Derjaguin B. V., Muller V. M., and Toporov Yu. P. Effect of Contact Deformations on the Adhesion of Particles // J. Colloid. Interface Sci. — 1975 (53), no. 2, P. 314—326

КЛАССИФИКАЦИЯ ВИДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Машкова Д.В.

Научный руководитель — профессор, д.т.н. Соломонов К.Н.

РГУПС, Воронеж

miss.mashkova96@yandex.ru

Значительную долю деталей для авиационной и ракетно-космической техники получают в процессах пластического формоизменения, которые характерны для технологий обработки металлов давлением. Предотвращение макродефектов, выявляемых с помощью разнообразных способов неразрушающего контроля [1], в таких процессах является сложной и актуальной задачей. Наиболее эффективным и мало затратным средством при этом служат различные виды моделирования указанных процессов. Для более рационального их использования целесообразно применение некоторой классификации.

Все виды моделирования можно условно разделить на два уровня.

К первому уровню можно отнести интеллектуальный и инфологический виды; ко второму – математическое, геометрическое, физическое и аналоговое моделирование.

Виды первого уровня применяются для решения плохо структурированных и информационно-логических задач.

Для решения структурированных задач используют виды моделирования второго уровня. К таким задачам можно отнести, например, моделирование пластического формоизменения материалов в процессах обработки давлением [2-3]. В то же время виды моделирования второго уровня можно разделить на теоретические (математическое и геометрическое), практические (физическое) и смешанного характера – аналоговое.

Инструментом для создания математических моделей может служить аппарат линейной алгебры, а также интегральное и дифференциальное исчисление.

Для решения некоторых задач пластического формоизменения применяются различные способы геометрического моделирования, которые используют известные инструменты высшей математики: дифференциальную, аналитическую и начертательную геометрии.

Физическое моделирование может служить не только практическим способом подтверждения теоретических разработок, но и средством получения результатов, которые не укладываются в общепринятую теорию.

Аналоговое моделирование можно отнести к смешанному виду, т.к. оно нередко реализуемо как в форме лабораторного опыта, так и виртуального эксперимента. Примером служит применение «песчаной аналогии» и «экви-теории» к моделированию процессов осадки [4-5].

Литература

1. Тищук Л.И., Соломонов К.Н. Применение неразрушающего контроля в процессах производства и эксплуатации транспортных систем // Труды XIV Всероссийской научно-технической конференции АКТ-2013. – Воронеж: Элист, 2013. – С. 287-291.
2. Соломонов К.Н. Моделирование течения металла в процессах объемной штамповки оребренных деталей // Технология легких сплавов, 2005, №1-4, с. 142-149.
3. Соломонов К.Н., Федоринин Н.И., Тищук Л.И. Моделирование технологических методик пластического деформирования // Изв. Самарского НЦ РАН, 2017, № 1, с. 517-519.
4. Соломонов К.Н., Абашкин В.П. Возможности компьютерного анализа осадки заготовок // Технология легких сплавов, 2008, № 2, с. 96-100.
5. Тищук Л.И., Соломонов К.Н., Мазур И.П. и др. Исследование картины течения металла при осадке // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, 2017, № 3, с. 37-44.

ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДА ПОЛОС ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ЗАДАЧ О КАЧЕНИИ УПРУГИХ ТЕЛ

Мещерякова А.Р.

Научный руководитель — академик, д.ф.-м.н. Горячева И.Г.

МФТИ, Москва

mif-almira@yandex.ru

Рассматривается пространственная задача о качении упругой сферы по упругому полупространству, сцепленному с вязкоупругим слоем. Качение сферы считается установившимся процессом. Область контакта состоит из зон сцепления и проскальзывания, границы которых определяются в ходе решения задачи. В зоне проскальзывания выполняется закон Кулона. Целью работы является сравнение распределений касательного напряжения в области контакта, полученных с помощью метода полос и вариационного метода, и определение границ применимости метода полос в решении задач трения качения с вязкоупругим слоем.

Ранее численное решение задачи о качении упругих тел с помощью алгоритма FASTSIM, основанного на методе полос [1], было получено в [2]. Аналитическое решение задачи о качении упругого цилиндра по основанию, состоящему из упругой полуплоскости и вязкоупругого слоя, показано в [3], где были рассмотрены случаи существования двух и трёх зон в области контакта, и влияние вязкости слоя на распределение касательного напряжения.

Задача нахождения касательного напряжения в области контакта решается методом полос и вариационным методом независимо друг друга. При решении задачи методом полос область контакта делится на полосы равной ширины в направлении качения сферы, затем в каждой полосе ищется решение плоской задачи. Нахождение касательного напряжения в области контакта вариационным методом сводится к поиску минимума функционала относительно касательных напряжений с учётом граничных условий [4].

Были получены распределения касательного напряжения с помощью метода полос и вариационного метода. В методе полос использовалось аналитическое решение плоской задачи, ранее полученное в [3]. Для распределений касательных напряжений, полученных вариационным методом и методом полос, было проведено исследование влияния свойств вязкоупругого слоя, скорости качения сферы и коэффициента трения скольжения на расположение зон сцепления и проскальзывания и касательную силу.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 19-31-90015).

Литература

1. Haines D.J., Ollerton E. Contact Stress Distributions on Elliptical Contact Surfaces Subjected to Radial and Tangential Forces // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. 1963. № 177(1). С. 95–114.
2. Kalker J.J. Simplified theory of rolling contact // Delft progress report. Series C: Mechanical and aeronautical engineering and shipbuilding. 1973. 1. P. 1-10.

3. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия // Москва: Наука. 2001. С. 480.
4. Гольдштейн Р.В., Зазовский А.Ф., Спектор А.А., Федоренко Р.П. Решение вариационными методами пространственных контактных задач качения с проскальзыванием и сцеплением // Успехи механики. 1982. Т. 5. № 3/4. С. 61-102.

ВИБРООБРАБОТКА КОРПУСА АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ИЗ ЖЕЛЕЗОХРОМОНИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ЭП718, СВАРИВАЕМОГО РОБОТИЗИРОВАННЫМ МЕТОДОМ СВАРКИ В СРЕДЕ ЗАЩИТНЫХ ГАЗОВ

Миннихметов В.А.

Научный руководитель — доцент, к.ф.-м.н. Медведев А.Ю.

УГНТУ, Уфа

vadim.mini@yandex.ru

Введение. На сегодняшний день производится разработка отечественного авиационного двигателя, изготовленного из железохромоникелевого сплава ЭП718. Главными характеристиками данного сплава является его температуростойкость, способность выдерживать длительное воздействие нагрузок и работа среди агрессивных сред [1].

Проблемы сварки корпуса двигателя заключается в том, что в виду температурного воздействия, а следовательно температурное расширение металла на температуростойкий материал происходит образования остаточных напряжений. Опасность данных напряжений заключается в значительном снижении прочности сварного шва и конструкции в целом, а также способствуют изменению геометрии изделия [2].

Метод. На сегодняшний день процесс сварки сплава ЭП718 производится благодаря аргонодуговой сварке. Технология аргонодуговой сварки основывается на использовании сварочной ванны, которая защищает от газов и примесей. Не смотря на успешное применение аргонодуговой сварки, в сварном соединении сплава ЭП718 присутствуют значительные остаточные напряжения, приводящие чаще всего к горячим трещинам, а также снижению прочности конструкции. Также в виду человеческого фактора и сложности свариваемого материала, сварное соединение не всегда удовлетворяет требования стандарт качества соединения [3].

Альтернативой использования аргонодуговой сварки является роботизированный метод сварки. Необходимость замены аргонодуговой сварки заключается в том, что при сварке сплава ЭП718 в нем остаются напряжения, приводящие к снижению прочности и изменению геометрии конструкции. Также в виду человеческого фактора, невозможно обеспечить идентичные сварные швы, что с учетом большого количества сварных соединений на корпусе двигателя приводят к значительному снижению прочности, а также невозможности обеспечения качественного сварного шва в виду сложности свариваемого материала.

Технология применения плавящимся электродом направлена на уменьшение температурного воздействия на свариваемый материал, что влечет к снижению расширения металла, следовательно, снижению остаточных напряжений. Использование роботизированного метода сварки позволяет улучшить качество сварного шва и прочность конструкции [4]. Выполняется при расплавлении электродной проволоки, подаваемой в плавильное пространство, его защита от воздуха осуществляется подачей защитного газа — инертного, активного или их смесей под давлением, большим атмосферного, вследствие чего воздух оттесняется и образуется соответствующая газовая среда.

Несмотря на термическую обработку сварного соединения вне зависимости от метода термообработки, в сварном соединении конструкции из сплава ЭП718 концентрируются остаточные напряжения. Как вариант снижения напряжений предлагается использование технологии вибрационной обработки материала [5]. Однако более эффективным и экономически выгодным является метод сопутствующей вибрационной обработки соединений в процессе сварки. В этом случае вибрационное воздействие оказывается не только на затвердевший металл сварного соединения, но и на расплавленный и кристаллизующийся металл сварочной ванны, что не только позволяет получить более широкий спектр положительных эффектов от обработки, но и дает возможность применения локального ввода упругих колебаний непосредственно в зону сварки, что значительно снижает требуемую мощность вибрационных устройств и повышает универсальность метода.

Отличительной особенностью работы является исследование использования роботизированного метода сварки плавящимся электродом в среде защитного газа вместо аргонодуговой сварки, которая используется в настоящее время. Внедрение технологии роботизированной сварки дает в перспективе возможность улучшить качество корпуса авиационного двигателя сделанного из сплава ЭП718, а также сокращение времени изготовления, что приводит к увеличению производительности без потери качества. Использование виброобработки сварного шва, в теории, способствует снижений остаточных напряжений в конструкции за счет пластической деформаций и равномерному формированию кристаллической решетки [6].

Литература

1. Сорокин Л.И. Свариваемость жаропрочных сплавов применяемых в авиационных газотурбинных двигателях. –1996.– 21с.
2. Никулин С.А., Штремель М.А., Файрушин А.М., Токарев А.С. Металловедение и термическая обработка металлов.–2018.–70с.
3. Аргоновая сварка – особенности и правила применения. [Электронный ресурс]. – UPL: <https://osvarka.com>.
4. Сварка плавящимся электродом. [Электронный ресурс]. – UPL: https://bstudy.net/685818/tehnika/svarka_plavyaschimsya_elektrodom
5. Лашенко Г. И. Технологические особенности дуговой сварки в углекислом газе с вибронгружением / Свариваемость и технология сварки конструкционных сталей и чугунов.– К.: ИЭС им. Е. О. Патона.–1985.–104с.
6. Мрыка Е.Л. Устранение остаточных напряжений с помощью нагружения и вибрации / Сб. науч. статей: Современные проблемы сварки и специальной электрометаллургии. — К.: Наукова думка.–1980.–84 с.

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЛОКАЛЬНОГО КРИТЕРИЯ РАЗРУШЕНИЯ К ПРОЦЕССАМ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ ДАВЛЕНИЕМ ПРИ НАЛИЧИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ВЫСОКИМИ УДЕЛЬНЫМИ СИЛАМИ ТРЕНИЯ

Морозов М.Ю.

Научный руководитель — доцент, к.ф-м.н. Лямина Е.А.

МАИ, Москва

michaelmor9791@gmail.com

В ходе процессов обработки металлов давлением можно выделить несколько характерных видов разрушения: на свободной поверхности, на оси симметрии, вблизи поверхности трения. Последний более прочих вызывает интерес, поскольку процесс деформирования материала в тонком слое вблизи поверхностей трения кардинально отличается от процесса деформирования в объеме. В свою очередь, это приводит к сильной неоднородности свойств вблизи таких поверхностей [1]. Применение универсального подхода к анализу процессов вблизи поверхностей трения не позволяет предсказать качественное поведение материала. Следовательно, необходимо ввести подход, учитывающий уникальные особенности поведения материала в данных условиях. Подобная проблема уже была решена в механике трещин, где для описания напряжений на конце трещины вводится коэффициент интенсивности [2]. В данной работе предлагается нелокальный критерий разрушения для предсказания начала разрушения на поверхности контакта. Теоретическое обоснование базируется на концепции коэффициента интенсивности скорости деформации с использованием модели идеально жесткопластического материала и модели поврежденности, основанной на использовании диаграммы пластичности [3].

В результате анализа рассмотрен обобщенный критерий разрушения. Функция, зависящая от трехосности напряженного состояния, является эмпирической и определяется экспериментальным образом для конкретных материалов. Величина, от которой она зависит, находится исходя из напряженно-деформированного состояния вблизи поверхности трения. Получены зависимости обобщенного критерия от расстояния до материала на поверхности контакта.

В настоящее время отсутствуют экспериментальные данные, позволяющие определить вид эмпирической функции. Выйти из положения позволяет анализ поведения зависимости обобщенного критерия от эмпирической функции, определяемой напряженно-деформируемым состоянием вблизи поверхности трения. Пересечение кривых соответствует параметрам процесса, при котором наступает разрушение.

Литература

1. Aukrust T., LaZghab S. Thin shear boundary layers in flow of hot aluminium // Int. J. Plast. 2000. V. 16. № 1. P. 59-71.
2. Слепян Л.И. Механика трещин. Л.: Судостроение, 1990. 296 с.
3. Александров С.Е., Лямина Е.А. Предсказание разрушения вблизи поверхностей трения в процессах обработки металлов давлением // ПМТФ. 2006. Т. 47. № 5. С. 169-174.

РАНЖИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ И МАТЕРИАЛОВ

Муратаев Т.А., Колесников Д.Н., Махмутянов А.Н.
КНИТУ-КАИ, Казань

Титановые, никелевые сплавы и стали аустенитно-мартенситного класса используются при изготовлении дисков и лопаток компрессора. Титановые, сплавы обеспечивают необходимую работоспособность в условиях комбинированного воздействия растяжения – сжатия в сочетании с циклическим изгибом при температурах до 550⁰С [1-6], стали – до 700⁰С, а деформированные никелевые сплавы - до 850⁰С [6-10]. В ступенях КВД с высокой степенью сжатия воздуха необходима проработка массивных участков металла дисков при ковке и штамповке, чему отвечает титановый сплав ВТ22 [8, 10-13].

На примере комплексном исследовании сплава с широким разнообразием структуры и свойств, используются фрагменты прокованного металла диска, штамповок, выполненных в три, пять и восемь переходов, а также плиты и прутки. Установлена иерархия структуры титановых сплавов и свойств конструкционной прочности (КП) по характеристикам: усталости металла, пластичности, ударной вязкости, прочности и статической трещиностойкости. Предварительно усталостные трещины выращиваются на установке УМП-02. Определены закономерности характеристик свойств и микроструктуры сплава ВТ22. Обосновываются технология штамповки и структура металла по критериям сопротивления усталости и характеристикам истинной диаграммы деформирования (S_K , ϵ_B , $m^{(0)}$ и E_K (см. табл.1) -т.е.: сопротивлению отрыва, равномерной пластичности, коэффициенту деформационного упрочнения и предельному модулю «Ильюшина»), ударной вязкости (KCT , KCU^t) и предельному значению коэффициента интенсивности напряжений (K_{IC}).

Таблица 1. Изменение механических характеристик сплава ВТ22 по вариантам технологии заготовок.

Заготовка	α/α_n	KCU , Дж/см ²	K_{IC} , МПа $\times M^{0.5}$	σ_B	S_K	$\sigma_{0.2}$	ϵ_B	δ	ψ	$m^{(0)}$ $\times 10^2$	E_K МПа
				МПа			%				
Штамповка 3 перехода	8-10	34	45	1225	1420	1145	5,0	7,5	15,5	4,9	10800
Штамповка 5 переходов	5,3- 6	38	50	1222	1560	1200	6,7	7,1	19,0	6,0	6680
Диск	8,0	30	46	1117	1191	1049	5,0	5,7	10,1	4,08	10170
Пруток	-	-	60	1240	1550	1160	6,0	15, 0	22,0	7,12	5910
Плита 20мм	-	-	67	1069	1600	1000	7,0	20, 0	37,0	8,96	2860
Штамповка 8 переходов	2,0	45	73	1110	1642	1049	6,5	21, 0	42,0	9,5	2710

На рис.1 указаны примеры изломов образцов сплава ВТ22 с предварительно выращенными трещинами - для определения характеристик K_{IC} металла различных зон (слева): обода, полотна и ступицы (А-К) технологических вариантов штамповки: в 3 перехода, 5 переходов (в центре) и 8 переходов. Аналогично многим характеристикам КП лучшие характеристики статической трещиностойкости обеспечиваются штамповкой в 8

переходов. Наиболее представительными критериями, обеспечившими повышение исходного уровня свойств (поковки и штамповки в 3 перехода) за счет новой технологии восьми переходной штамповки до требуемого уровня, проявили себя следующие, улучшив свои значения: E_K в 3,75 раза, $\chi = \sigma_{в}^p / \sigma_{в}^{сж}$ - в 3,5 раза, $\varepsilon_{эф}$ (при $\sigma_z / \sigma_{\theta} = 0,5$) в 3,2 раза, ψ в 3,1 раза и $m^{(0)}$ в 1,7 раз. Эффективность улучшения конструкционной прочности сплава определяется морфологией фаз и концентрацией составляющих структуры $\alpha + \alpha_{п} + \alpha^I + \alpha^{II}$ и $\beta_{п}$ -фаз. Причем лучшие свойства обеспечиваются меньшим значением соотношения параметра структуры $\alpha / \alpha_{п}$. Выявлены и указаны изменения механических свойств на участках штамповок: обод, полотно и ступица сплава BT22 в табл. 4. Большее значение K_{IC} , получено в ободной части заготовки, наибольшим уровнем прочности S_K обладает полотно. В металле ступицы выявлены лучшие значения большинства характеристик КП: K_{CU} , ψ , коэффициента деформационного упрочнения - $m^{(0)}$ и универсального показателя - E_K (см. табл. 2).

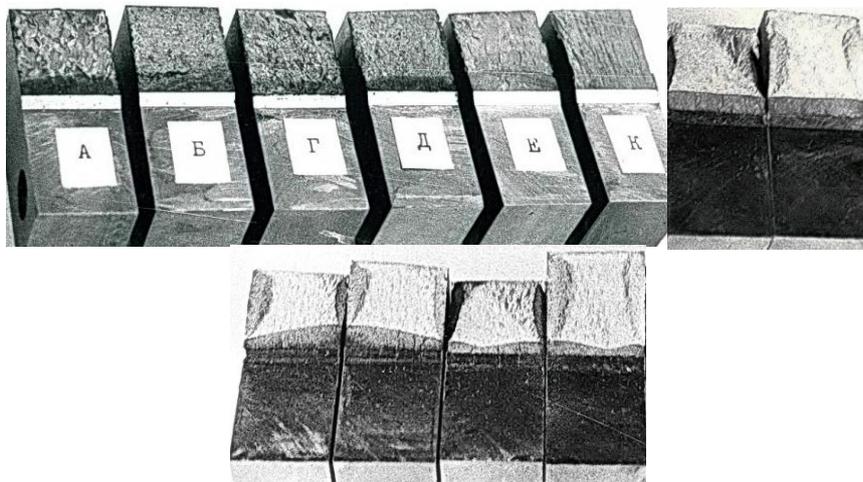


Рис.1. Виды образцов, испытанных для определения критических значений коэффициентов интенсивности напряжений (K_{IC}) по вариантам участков штамповки: в 3 перехода, 5 переходов (в центре) и 8 переходов (справа).

Для косвенного определения наиболее представительной характеристики универсального критерия (прочности, деформационного упрочнения и пластичности) - E_K , экспериментально подтверждено устойчивой регрессионной зависимостью согласование последней с доступным стандартным показателем - относительное сужение титановых сплавов (рис.2).

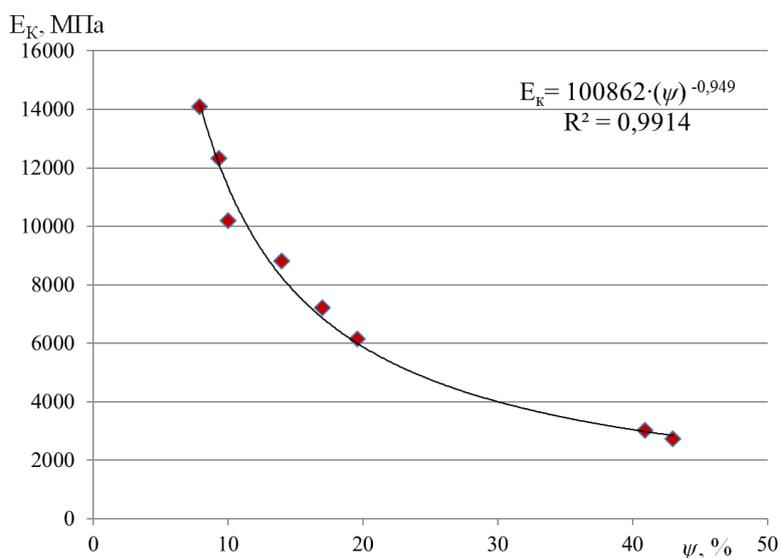


Рис.2. Пример согласования характеристик КП титановых сплавов BT6 и BT22 по вариантам технологических состояний заготовок.

Таблица 2. Механические характеристики сплава ВТ22 на участках обод, полотно и ступица заготовок дисков.

Штамповка	Участок	КСУ, Дж/см ²	σ_b	S_K	$\sigma_{0.2}$	K_{IC} , МПа ^{x_m0,5}	δ	Ψ	$m^{(0)}$ x10 ²	E_K МПа
			МПа				%			
3 перехода	Обод	35	1200	1415	1150	49	8,8	16	6,0	7200
	Полотно	33	1230	1390	1160	41	6,9	16	5,0	13100
	Ступица	36	1215	1400	1145	46	8,9	18	4,1	10170
8 переходов	Обод	45	1200	1550	1050	88	17,0	41	8,8	2900
	Полотно	43	1120	1640	1040	-	17	38,0	7,9	2800
	Ступица	53	1120	1480	1050	68	18	47,0	9.8	2700

Полученные результаты позволили ужесточение ТУ на технологию изготовления дисков КВД обеспечили улучшение характеристик конструкционной прочности сплава ВТ22 в разы и позволили заметно ускорить доводку ГТД в целом.

Литература

1. Муратаев Ф.И., Шканов И.Н. Обоснование технологии обработки дисков компрессоров по характеристикам статического и циклического деформирования // Известия вузов «Авиационная техника», 1999, № 1. с43-47.
2. Муратаев Ф.И., Муратаев А.Ф. Исследование повреждаемости металла дисков компрессора ГТУ // ISSN 2078-6255. Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева 2016 №4. С. 31-35.
3. Шканов И.Н., Муратаев Ф.И. Исследование критериев сопротивления усталости в задачах моделирования эксплуатационных и технологических состояний элементов двигателей // Изв. вузов. Авиационная техника. 1996. №4. С.58–61.
4. Муратаев Ф.И., Жаржаназы М.А. Обеспечение конструкционной прочности титановых сплавов по критериям предельной пластичности и сопротивления усталости // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева, 2013. №1. С.50-54.
5. Муратаев Ф.И., Хакимов С.Ш. Обоснование микроструктуры и соотношений характеристик прочности и пластичности титановых сплавов по критериям сопротивления усталости // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева, 2014. № 3. С.110-113.
6. Полмеар Я. Лёгкие сплавы: от традиционных до нанокристаллов – М: Техносфера, 2008.-464с.
7. Муратаев Ф.И., Муратаев А.Ф. Влияние состава и морфологии интерметаллической фазы сплава IN-738LC на повреждаемость лопаток газовых турбин // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева 2015 №3 С.43-48.
8. Муратаев Ф.И., Мухамадеев И.М. Закономерности структурных состояний и характеристик конструкционной прочности штамповок титанового сплава // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева 2020 №2.
9. Ф.И. Муратаев, А.Ф. Муратаев Структура и свойства конструкционной стали после длительного перегрева // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева 2016, №3. С. 82-86.
10. Муратаев Ф.И., Клабуков М.А. Исследование закономерностей структуры и усталостной повреждаемости литых лопаток из сплава IN-738LC // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева, 2014. № 3. С. 107-109.
11. Клабуков М.А., Колесников Д.Н. Согласование характеристик структуры и свойств титановых сплавов. // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева 2020 №2
12. Муратаев Ф.И., Махмутянов А.Н., Муратаев Т.А. Превращения титановых сплавов в лазерном пятне при ударном упрочнении // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева 2020 №2.
13. F I Murataev et al 2019 IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering 570 012070.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТАВА И СВОЙСТВ СПЛАВА ВТ6 ПРИ УДАРНОМ ЛАЗЕРНОМ УПРОЧНЕНИИ

Мухамадеев И.М., Муратаев Т.А., Загидуллин А.
 Научный руководитель — доцент, к.т.н. Муратаев Ф.И.
 КНИТУ-КАИ, Казань
 ilshatv09@yandex.ru

В работе проведены исследования структуры и микротвердости образцов титанового сплава ВТ6 в виде тонких пластин, подвергнутых лазерному ударному упрочнению.
 The paper studies the structure and microhardness of samples of VT6 titanium alloy in the form of thin plates subjected to laser hardening.

В процессе эксплуатации отдельные элементы ГТД: пазы дисков, замки и бандажные полки рабочих лопаток компрессора из титановых, сплавов помимо сложных условий нагружения [1, 2], подвергаются интенсивному изнашиванию. Для предотвращения этого

процесса могут использоваться лазерные технологии, обеспечивающие заметное повышение поверхностной твердости и износостойкости [3-5] упомянутых деталей КВД и КНД.

В качестве источников упрочнения в работе использовались лазерный комплекс «FMark-20 RL» и модуль импульсной лазерной наплавки на базе волоконного генератора «ЛС-10» [4, 6].

В результате импульсного ударного упрочнения на поверхности формируется литая структура, а в подложке микроструктура представлена α дендритами и высокодисперсной или игольчатой $\alpha\beta$ - превращенной фазами. Она фиксируется с помощью сканирующего электронного микроскопа «AurigaCrossBeam» [5] с программным обеспечением «SmartSem». В результате изменяется микротвёрдость (HV100, МПа) сплава ВТ6 в зонах лазерного воздействия (ЗЛВ – от поверхности в глубину) и степень его упрочнения относительно участков подложки составляет до 167%, что соответствует \sim HRC65 при режимах лазерного генератора: скорость обработки $V = 20$ мм/сек, число проходов $n = 20$, средняя мощность $N = 20$ (100%), $f = 21500$ Гц, размер лазерного пятна $d = 40$ мкм.

Анализ структуры ЗЛВ показывает, что она состоит из зон: термического влияния (ЗТВ), оплавления (ЗО) и кратера. Имеет участки непосредственного взаимодействия с внешней средой, т.е. кратер («плато») с литой неоднородной структурой металла и изолированного от взаимодействия участка литой структуры включая фрагмент с частичным оплавлением. На этом участке над основным сплавом ВТ6 твердость несколько увеличивается. Геометрические параметры ЗЛВ и особенно ЗО в титановых сплавах сильно зависят от режимов лазерной обработки. При сочетании больших величин теплового вложения высококонцентрированной энергии и особенностей теплофизических свойств титана возможны случаи негативного результата. Т.е. при значительных градиентах температуры, давление испаряющихся паров титана приводит к выдавливанию части жидкого металла, способствуя увеличению проплавливающей способности лазерного луча.

Литература

1. Муратаев Ф.И., Муратаев А.Ф. Исследование повреждаемости металла дисков компрессора ГТУ // ISSN 2078-6255. Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева 2016 №4. С. 31-35.
2. Муратаев Ф.И., Хакимов С.Ш. Обоснование соотношений микроструктуры и свойств титановых сплавов для задач прогнозирования сопротивления усталости. // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева 2014 №4. С.110-114.
3. Клабуков М.А., Данилов Е.В. Обоснование состава материалов и технологий рабочих поверхностей микрохирургического инструмента // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева, 2019. №2. С. 66-73.
4. Муратаев Ф.И., Клабуков М.А. Особенности лазерного ударного упрочнения сталей и титановых сплавов // Вестник КГТУ им.А.Н. Туполева. 2012 №4. С. 82-84.
5. F I Murataev et al Ranking materials technologies by limiting characteristics of heat-resistant alloys and their longevity in the problems of import substitution 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.570 012070.
6. Муратаев Ф.И., Махмутянов А.Н., Муратаев Т.А. Превращения титановых сплавов в лазерном пятне при ударном упрочнении // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева 2020 №2.

ЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД РАСЧЁТА ОБТЕКАНИЯ МОДЕЛЕЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ СВЕРХЗВУКОВЫМИ СТРУЯМИ ВЧ-ПЛАЗМОТРОНА

Набережнев П.А.¹, Колесников А.Ф.²

¹МАИ (НИУ), Москва

²ИПМех РАН, Москва

sadpavlov@gmail.com, koles@ipmnet.ru

Введение. Задачи сверхзвукового обтекания затупленных тел возникают при исследованиях движения тел в атмосферах планет. Основной интерес представляет определение силового и теплового воздействия атмосферы на движущееся в ней тело. Эту проблему изучают экспериментальными и теоретическими методами. Важны исследования теплообмена в высокоэнтальпийных сверхзвуковых потоках на ВЧ-плазматронах. При этом необходимы расчёты параметров обтекания моделей и теплообмена в струях диссоциированного воздуха. В рамках модели сплошной среды при малых и умеренных числах Re наиболее строгим будет описание обтекания тел вязким газом с помощью уравнений Навье-Стокса. В [1] для условий экспериментов в ВЧ-плазматроне в сверхзвуковых струях неравновесного диссоциированного воздуха выполнено численное исследование обтекания цилиндрических моделей с использованием полных уравнений Навье-Стокса. Для гладких тел

целесообразной, как с точки зрения описания течения, так и с точки зрения численного решения, будет постановка в рамках уравнений Навье-Стокса, упрощенных в параболическом приближении, когда расчёт можно производить маршевыми методами. Для экспериментальной практики необходимы быстрые и точные методы расчета течения на линии торможения и тепловых потоков в критической точке модели.

В работе используется эффективный метод [2], разработанный для расчета течения в вязком ударном слое около тела сферической формы, обтекаемого сверхзвуковыми потоками совершенного газа. Метод адаптирован и применен для расчета течений диссоциированного воздуха на линии торможения для условий экспериментов на ВЧ-плазмотроне. Из полных уравнений Навье-Стокса выводится система приближенных уравнений параболического типа, для которой граничные условия ставятся на теле и в невозмущенном потоке. Уравнения и граничные условия аппроксимируются разностной схемой повышенной точности, разностные уравнения решаются прогонкой [3].

Постановка задачи. Сверхзвуковое стационарное осесимметричное течение вязкого 5-компонентного воздуха (N_2 , O_2 , NO , N , O) около сферического затупления модели рассматривается в ортогональной системе координат, связанной с поверхностью тела.

В этой системе координат расписывается система уравнений Навье-Стокса и уравнение непрерывности (с учетом стационарности процесса), а также выражения для компонент тензора вязких напряжений. Эти уравнения преобразуются к новым переменным типа переменных Дородницына и к виду, удобному для численного расчёта.

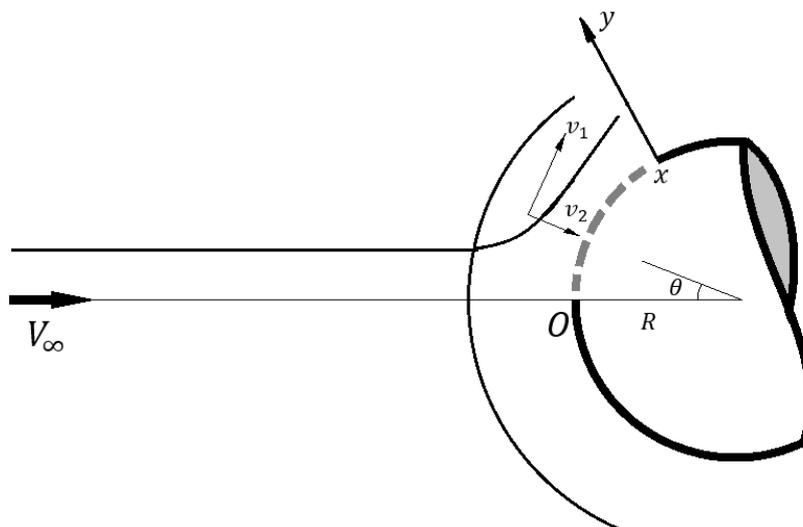


Рис. 1. Ортогональная система координат (V_∞ - скорость невозмущенного потока; R – радиус сферической поверхности; v_1, v_2 – компоненты скорости потока).

В эксперименте модель обтекается воздухом, предварительно нагретым и диссоциированным в ВЧ-плазмотроне. При этом химический состав струи, обтекающей модель, существенно неравновесный. Для анализа теплообмена при малых давлениях в барокамере и умеренных числах M можно считать, что химический состав в сверхзвуковом потоке и в ударном слое около модели «заморожен».

Методы. Уравнения течения газа на линии торможения преобразуются к новым безразмерным переменным и вводятся вспомогательные функции, которые позволяют сократить количество неизвестных величин. В численного решения полученных приближенных уравнений применяется метод Петухова [3].

Вывод. Для одного из экспериментов на ВЧ-плазмотроне (параметры набегающего потока диссоциированного воздуха приведены в таблице ниже) были получены следующие результаты (величины на графиках безразмерные)

На графиках выделяются характерные зоны. Так, например, на графике скорости заметны зоны невозмущенного потока, ударной волны, невязкого течения. Аналогичные зоны заметны на профиле температуры: невозмущенный поток, ударная волна, область невязкого течения и пограничный слой.

Данные выше были получены при следующих параметрах набегающего потока.

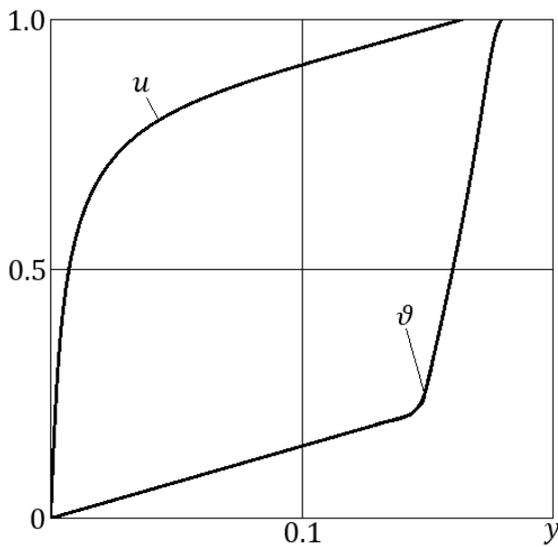


Рис. 2. Профили скорости v и градиента скорости u .

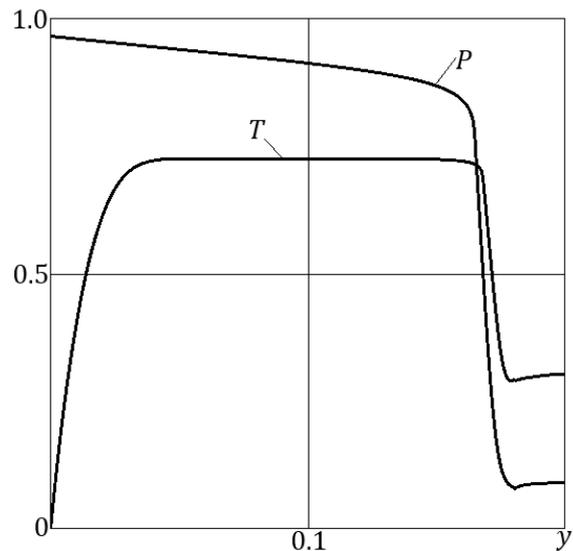


Рис. 3. Профили давления P и температуры T .

Параметры потока	
Число Кнудсена, $K_{n\infty}$	0.0048
Число Маха, M_∞	3.0
Число Рейнольдса, Re_∞	924.5
Число Рейнольдса, Re_s	419.2
Скорость км/сек	3.932
Полная энтальпия, МДж/кг	18.25
Температура, К	3300
Давление, атм	0.02
Плотность, кг/м ³	$0.1618 \cdot 10^{-2}$
Молекулярный вес, г/моль	22.212
Отношение теплоемкостей, γ	1.39
Число Прандтля, ρ	0.811
Вязкость, г/см*сек	$0.1032 \cdot 10^{-2}$
Температура стенки, К	300
Температурный фактор	0.033
Радиус сферы, см	1.5
Химический состав	
N ₂	0.6672
O ₂	$0.5180 \cdot 10^{-3}$
NO	$0.1335 \cdot 10^{-1}$
N	$0.9207 \cdot 10^{-1}$
O	0.2269

Литература

1. Гордеев А. Н., Колесников А. Ф., Сахаров В. И. Экспериментальное и численное исследование теплообмена высокочастотных недорасширенных струй воздуха с цилиндрическими моделями // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2018, № 5. С. 125–133.
2. Гершбейн Э.А., Колесников А.Ф. Исследование влияния вдува на течение в гиперзвуковом вязком ударном слое вблизи линии торможения затупленного тела // Известия АН СССР, Механика жидкости и газа. 1980, № 1, С. 199-202.
3. Петухов И. В. Численный расчёт двумерных течений в пограничном слое // Сборник «Численные методы решения дифференциальных и интегральных уравнений и квадратурные формулы» М: Наука, с. 304-325, 1964 г.

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ СХЕМ НАГРУЖЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЛАСТИ СВЕРХМНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

Налётов А.Е.

Научный руководитель — к.т.н. Никитин А.Д.

МАИ, Москва

nalyotovandrey@rambler.ru

С развитием современной техники и технологий, многие ответственные элементы инженерных конструкций, такие как детали двигателей скоростных поездов, диски и лопатки авиационных газотурбинных установок, подвержены высокочастотному нагружению. Применительно к авиационной технике, частоты нагружения могут достигать нескольких килогерц, что приводит к наработкам порядка 10^8 – 10^{10} циклов высокочастотного нагружения. Подобный режим усталостного нагружения известен в научной литературе как область сверхмногоциклового усталости (СВМУ). Режим СВМУ принципиально отличается от известных областей малоциклового и многоциклового усталости (МЦУ и МНЦУ соответственно) своим подповерхностным механизмом зарождения усталостных трещин. Более того, экспериментально было показано, что различные материалы имеют различную восприимчивость к подобному режиму нагружения. Так, для некоторых конструкционных сталей, различие в пределах выносливости на базах испытаний $[10]^6$ и $[10]^9$ циклов может достигать 30 процентов. Таким образом, использование классических критериев оценки циклической прочности для таких материалов представляется затруднительным.

Современный подход к моделированию усталостных характеристик в подобных режимах нагружения основан на полумпирическом методе, когда основные параметры критерия СВМУ разрушения определяются из одноосных экспериментов и верифицируются на сложных схемах СВМУ нагружения, таких как кручение, изгиб или более сложных. В литературе известны методы проведения испытаний на трехточечный изгиб конструкционных материалов с применением установки СВМУ нагружения. Принципиальной особенностью подобных исследований является выбор и оптимизация образцов согласно концепту сверхмногоциклового нагружения. При этом в образце устанавливается стоячая волна с узлами смещений в рабочей части.

В настоящей работе проводится численное моделирование геометрии образцов и оптимизации их основных параметров для проведения усталостных испытаний на двухмерный изгиб для авиационных титановых и алюминиевых сплавов. Приводится анализ полей напряжений, возникающих в рабочих зонах образцов, а так же делается вывод о возможности реализации новой авторской схемы СВМУ нагружения на практике.

МЕТОД ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ПРОШИВКИ ОТВЕРСТИЙ МАЛОГО ДИАМЕТРА В КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ

Овчинников Д.В.

Московский Политех, Москва

mitya.ovchinnikov.95@mail.ru

Электролитно-плазменная обработка является развивающейся и одной из перспективных технологий обработки керамических материалов наряду с методами лазерной и ультразвуковой обработки. В работе было изучено как влияние основных параметров режима обработки на качество получаемых отверстий, так и производительность метода. Полученные результаты позволят автоматизировать процесс прошивки отверстий в керамических материалах и послужат основой для дальнейшего изучения метода электролитно-плазменной обработки.

Развитие медицины, приборо- и машиностроения, авиации и космонавтики неразрывно связано с применением материалов, обладающими химической инертностью, термической стойкостью, низкой электропроводностью, высокой твердостью и пр. В последнее десятилетие при создании различных изделий все большее применение находят

керамические и композиционные материалы, для обработки которых создаются новые и модернизируются существующие технологии их обработки [1,2].

Вследствие повышенной твердости и износостойкости керамики ее эффективная обработка возможна только с использованием алмазного инструмента, но даже применение алмаза не позволяет достичь высокой производительности резания, поэтому обработка керамических деталей весьма дорогая. По данным японских исследователей, стоимость обработки керамики в десятки тысяч раз превышает стоимость обработки конструкционных сталей [3].

В связи с предъявлением высоких технических требований к изготовлению изделий, имеющих диаметры отверстий или ширину канавок менее 1 мм, появляется необходимость в применении таких физико-химических методов обработки, как ультразвуковая, лазерная и электролитно-плазменная.

В данной работе проведены экспериментальные исследования основных параметров режима прошивки отверстий в керамических материалах методом электролитно-плазменной обработки.

Исследования проводились на специальном экспериментальном оборудовании, позволяющем получать отверстия малого диаметра как методом поступательной подачи инструмента, так и с приданием ему вращения частотой 800...10000 мин⁻¹. Экспериментальная установка позволяет прошивать отверстия в проводниках и в диэлектриках.

Экспериментальным образцом являлась пластина предметного стекла размером 76мм x 26мм x 2мм из материала SiO₂. В качестве электрода-инструмента использовалась проволока из пружинной стали 60Г и латуни Л62 диаметром 0,2...0,8мм.

Прошивка отверстий проводилась в среде раствора NaOH концентрации 10...40% как поступательным движением электрода, так и с помощью вращения. В ходе прошивки отверстий на электрод инструмент, а также погруженный в ванну с электролитом анод подавался импульсный электрический ток величиной 1...10А, напряжением 30...70В длительностью импульсов 100...490мкс и частотой их следования 1000...10000Гц.

При помощи осциллограмм тока и напряжения для искровой формы разряда, полученных при помощи осциллографа Tekronix NBS1154, была определена энергия импульса *W*.

Значения частоты вращения электрода инструмента в процессе прошивки отверстий получены с помощью цифрового бесконтактного тахометра.

Диаметр отверстия, зоны микротрещин определены при помощи микроскопа Olympus BX 51.

В ходе эксперимента выявлены зависимости диаметра получаемых отверстий, диаметра зоны микротрещин, скорости обработки от значений энергии импульса, частоты вращения электрода-инструмента.

ФОРМУЛИРОВКА СООТНОШЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕЙСТВУЮЩИХ КАСАТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И СКОРОСТЕЙ СДВИГОВ В ТЕРМИНАХ РАЗГРУЖЕННОЙ РЕШЕТОЧНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

Окатьев Р.С.

Научный руководитель — профессор, д.ф.-м.н. Трусов П.В.

ПНИПУ, Пермь

okatjevrs@gmail.com

В настоящее время многоуровневое моделирование представляется одним из наиболее эффективных инструментов, позволяющих детально описывать поведение материалов, испытывающих интенсивные пластические деформации. В работе рассматривается модификация двухуровневой модели для описания деформирования моно- и поликристаллических материалов, основанной на физических теориях пластичности. Макроуровень соответствует представительному макрообъему, на мезоуровне рассматривается деформирование отдельных кристаллитов.

При решении нелинейных задач важным является вопрос о разложении движения на квазитвердое и деформационное. Используется разложение движения, предложенное в работе [1]. Градиент деформации представляется в виде мультипликативного разложения на

упругую (упругие искажения кристаллической решетки), ротационную (поворот кристаллической решетки как жесткого целого) и пластическую составляющие. Для привязки к симметричным свойствам материала в недеформированной конфигурации вводится декартова кристаллографическая система координат (КСК), связанная с кристаллографическими направлениями в кристаллической решетке. Вместе с КСК вводится жесткая декартова подвижная система координат (ПСК), совпадающая с КСК в начальный момент времени и связанная с ней в течение процесса деформирования. Привязку ПСК к КСК можно осуществлять различными способами. При этом оказывается, что результаты моделирования зависят от выбора этой связи [2, 3].

Для избавления от такой зависимости предлагается переформулировать соотношения мезоуровня для определения действующих касательных напряжений и скоростей сдвигов по системам скольжения в терминах разгруженной решеточной конфигурации, которая получается из актуальной снятием упругих деформаций решетки. В качестве исходного соотношения предлагается использовать физически корректный закон Шмида, определенный в терминах актуальной конфигурации. Выводятся соотношения, связывающие действующие касательные напряжения в текущей конфигурации с касательными напряжениями, определенными по второму тензору напряжений Пиоли-Кирхгоффа и тензору напряжений Манделя. Соотношение для скоростей сдвигов по системам скольжения принимается в виде, аналогичном используемому в терминах актуальной конфигурации.

Полученные соотношения встраиваются в модель мезоуровня. Проводятся расчеты НДС при сложном нагружении. Показано, что введенные модифицированные соотношения позволяют устранить зависимость результатов моделирования от типа привязки ПСК к КСК.

Литература

1. Трусов П.В., Швейкин А.И., Янц А.Ю. О разложении движения, независимых от выбора системы отсчета производных и определяющих соотношениях при больших градиентах перемещений: взгляд с позиций многоуровневого моделирования // Физическая мезомеханика, 2016. – Т. 19, Вып. 2. – С. 47-65.
2. Трусов П.В., Швейкин А.И.. Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения /П.В. Трусов, А.И. Швейкин. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2019. – 605 с.
3. Shveykin A.I., Trusov P.V. Multilevel models of polycrystalline metals: comparison of relations describing the crystallite lattice rotations // Nanoscience and Technology: An International Journal, 2019. – V. 10, №1. – pp. 1-20.

МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКАНИЯ ДИОКСИДА УРАНА

Орлова Ю.

Научный руководитель — к.ф.-м.н. Колотова Л.Н.
МФТИ, г. Долгопрудный
orlova.yu@phystech.edu

Диоксид урана представляет большой технологический интерес благодаря его использованию в качестве ядерного топлива в энергетических реакторах. В технологической схеме получения таблеток оксидного ядерного топлива одним из основных следует считать процесс спекания. Несмотря на то, что спекание UO_2 широко осуществляется в промышленном масштабе, многие стороны этого процесса остаются еще не выясненными в достаточной степени.

С помощью метода молекулярной динамики исследован процесс зарастания пор при спекании UO_2 , в частности влияние межзеренной границы на скорость данного процесса. Расчеты проводятся в условиях nve ансамбля, при заданном потенциале [1], для устранения поверхностных эффектов используются периодические граничные условия. Выполнена оценка коэффициентов поверхностной и зернограничной диффузии урана. Измерена скорость зарастания пор для различных кристаллографических ориентаций, проведена оценка вклада межзеренной границы в данный процесс. Исследовано влияние размера частиц на скорость спекания. Результаты работы сопоставлены с теоретическими моделями, представленными в [2]. Все расчеты проведены с использованием пакета LAMMPS [3].

Литература

1. Поташников С. И. и др. Молекулярно-динамическое восстановление межчастичных потенциалов в диоксиде урана по тепловому расширению //Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2007. – №. 8. – С. 43-52.
2. Rahaman M. N. Ceramic processing and sintering. – CRC press, 2017.
3. Plimpton S. Fast parallel algorithms for short-range molecular dynamics //Journal of computational physics. – 1995. – Т. 117. – №. 1. – С. 1-19.

МНОГОУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ МАРТЕНСИТНОГО ПЕРЕХОДА В СТАЛЯХ ПРИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Подседерцев А.Н.

Научный руководитель — доцент, к.ф.-м.н. Кондратьев Н.С.

ПНИПУ, Пермь

stevenmoore@ya.ru

В работе рассматриваются вопросы, связанные с влиянием твердотельных фазовых переходов на физико-механические свойства материала. Для описания фазовых трансформаций при термомеханическом воздействии в представительном макрообъеме, строится двухуровневая математическая модель твердотельных фазовых переходов с дальнейшей численной реализацией.

Введение. В настоящее время термомеханическая обработка широко применяется в промышленности для обработки сталей, что ведет к изменению физико-механических свойств. Улучшение физико-механических свойств достигается за счет изменения состояния зеренной и дефектной структуры различных масштабных уровней [1]. Многочисленные экспериментальные исследования показывают, что фазовые превращения являются основной причиной изменения физико-механических характеристик сталей, обеспечивая их широкое использование [2]. Экспериментальное исследование данного явления с целью получения материалов с улучшенными характеристиками является ресурсоемким, поэтому актуальной является задача построения моделей, описывающих эволюцию структуры материала при термомеханической обработке с учетом твердотельных фазовых превращений. В работе рассматривается фазовое превращение аустенита в мартенсит. Мартенситная фаза обладает наиболее высокой твердостью в сравнение с другими структурными составляющими сплава, низкой пластичностью и повышенной хрупкостью. Появление более твердой мартенситной фазы повышает прочностные характеристики сплава, а остаточный аустенит предотвращает разрушения при небольших деформациях.

Методы. Целью работы является определение напряженно-деформированного состояния и фазового состава представительного объема макроуровня в зависимости от термомеханических нагрузок. В работе используется двухуровневый подход к описанию неупругого деформирования, основанный на физических теориях пластичности. При построении описания эволюции внутренней структуры материалов явным образом включаются внутренние переменные в структуру соотношений, отражающих состояние и изменение микроструктуры, и эволюционных уравнений для них.

Модель. Рассматривается представительный объем макроуровня, в котором под действием нагрузок и при изменении температуры происходит мартенситный переход. Объем макроуровня представляет собой совокупность элементов мезоуровня – отдельных зерен с определенной ориентацией относительно лабораторной системы координат. На мезоуровне выделяются следующие механизмы неупругого деформирования: пластическое деформирование за счет сдвига по кристаллографическим системам скольжения и деформирование за счет протекающих в материале фазовых превращений. Модель мезоуровня включает в себя конститутивные соотношения физической теории пластичности с учетом фазовых превращений, кинематические соотношения для меры деформации, а также эволюционные уравнения для доли фаз, сдвигов по СС и критических напряжений.

Математическая модель задачи на мезоуровне имеет вид:

$$\sigma^{cr} \equiv \dot{\sigma} - \omega \cdot \sigma + \sigma \cdot \omega = \tilde{\mathbf{n}} : (\zeta - \zeta^{in} - \alpha \theta), \quad (1)$$

$$\zeta^{in} = \zeta^p + \zeta^{tr}, \quad (2)$$

$$\zeta^{tr} = \sum_{\beta=1}^{24} \dot{\xi}_M^{(\beta)} \mathbf{s}^{(\beta)} \mathbf{m}^{(\beta)}, \quad (3)$$

$$\zeta^p = \xi_A \sum_{k=1}^n \mathbf{P}^{(k)} \dot{\gamma}^{(k)}, \quad (4)$$

$$\dot{\gamma}^{(k)} = \dot{\gamma}_0^{(k)} H\left(\tau^{(k)} - \tau_c^{(k)}\right) \left| \frac{\tau^{(k)}}{\tau_c^{(k)}} \right|^{1/m_c} \text{sign}\left(\tau^{(k)}\right), \quad (5)$$

$$\tau^{(k)} = \mathbf{P}^{(k)} : \boldsymbol{\sigma}, \quad (6)$$

$$\dot{\tau}_c^{(k)} = \tau_{c0}^{(k)} \left(\sum_{j=1}^n a_j^{(k)} \left(\frac{\gamma^{(j)}}{\sum_{j=1}^n \gamma^{(j)}} \right)^\psi \dot{\gamma}^{(j)} \right) - \tau_{c0}^{(k)} B \left(\frac{\tau_c^{(k)} - \hat{\tau}_c}{\tau_{c0}^{(k)}} \right)^m \exp\left(-\frac{Q_i}{R\theta}\right), \quad (7)$$

$$\tau_c^{(k)}(0) = \tau_{c0}^{(k)}, \quad (8)$$

Здесь, $\boldsymbol{\omega}$ – тензор спина решетки, который описывает движение подвижной кристаллографической системы координат (КСК) относительно ЛСК, $\boldsymbol{\alpha}$ – тензор термического расширения, $\boldsymbol{\sigma}$ – тензор напряжения Коши, $\tilde{\mathbf{n}}$ – тензор упругих свойств кристаллита, ζ^p – пластическая составляющая тензора неупругой скорости деформации, ζ^{tr} – неупругая составляющая скорости деформации, связанная с мартенситным переходом.

$\xi_A = \frac{V_A}{V}$, $\xi_M = \frac{V_M}{V}$ – объемная доля аустенита и мартенсита соответственно, $\dot{\gamma}^{(k)}$ – скорость сдвига по k -й системе скольжения соответствующей фазы, $\tau^{(k)}$ – сдвиговое напряжение, действующее в k -й системе скольжения; $\tau_c^{(k)}$ – критическое напряжение сдвига по k -й системе скольжения. Для учета термического влияния на изменение сопротивления сдвигу $\tau_c^{(k)}$ введен закон упрочнения с явной зависимостью от температуры. $a_j^{(k)}$ – модули упрочнения, $\tau_{c0}^{(k)}$ – начальный предел текучести в k -й системе скольжения; $\gamma^{(j)}$ – накопленный сдвиг на соответствующей j -й системе скольжения j .

С использованием значений градиента перемещений и температуры для каждого элемента мезоуровня, определенных из решения краевой задачи, вычисляется доля мартенситной фазы с использованием соотношения вида:

$$\dot{\xi}^{(\beta)} = \begin{cases} \dot{\xi}_0 \tanh\left(\frac{f^{(\beta)} - f_{cr}^{(\beta)}}{\nu f_{cr}^{(\beta)}}\right) & \text{если } f^{(\beta)} \geq f_{cr}^{(\beta)} \\ 0 & \text{иначе} \end{cases} \quad (9)$$

где $f_{cr}^{(\beta)}$ – критическое значение движущей силы на трансформационной системе, ν – материальный параметр, $f^{(\beta)}$ – движущая сила, которую можно представить в виде механической и термической составляющих.

$$f_m^{(\beta)} = \boldsymbol{\sigma} : \mathbf{s}^{(\beta)} \mathbf{m}^{(\beta)} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} (\mathbf{f}^{eT} \cdot \mathbf{f}^e - \mathbf{I}) : \tilde{\mathbf{n}} : \frac{1}{2} (\mathbf{f}^{eT} \cdot \mathbf{f}^e - \mathbf{I}) \right) \quad (10)$$

$$f_{th}^{(\beta)} = \rho_0 (h^{(\beta)} - h_A) \left(\theta \ln\left(\frac{\theta}{\theta_T}\right) - (\theta - \theta_T) \right) + \rho_0 \frac{g_M}{\theta_T} (\theta - \theta_T) \quad (11)$$

В этих соотношениях h_A – удельная теплота фазового перехода фазы аустенита, $h^{(\beta)}$ – удельная теплота фазового перехода фазы мартенсита, θ_T – температура мартенситного перехода при отсутствии упругих деформаций, θ – температура, g_M – скрытая теплота мартенситного перехода.

Результаты. Проведен численный эксперимент для стали 08X18H10 (AISI 304). Стали такого класса обладают повышенной прочностью и, одновременно, пластичностью, что дает им преимущество в процессе формования. Их особенность объясняется связью движения дислокаций и мартенситных фазовых переходов при помощи внутренних напряжений. Численный эксперимент проводился на растяжение стали при температуре -60°C . При данной температуре известно, что этот сплав дает большое количество индуцированного деформацией мартенсита. Построена зависимость интенсивности напряжений от интенсивности накопленных деформаций (рис.1). Получено удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных данных [3].

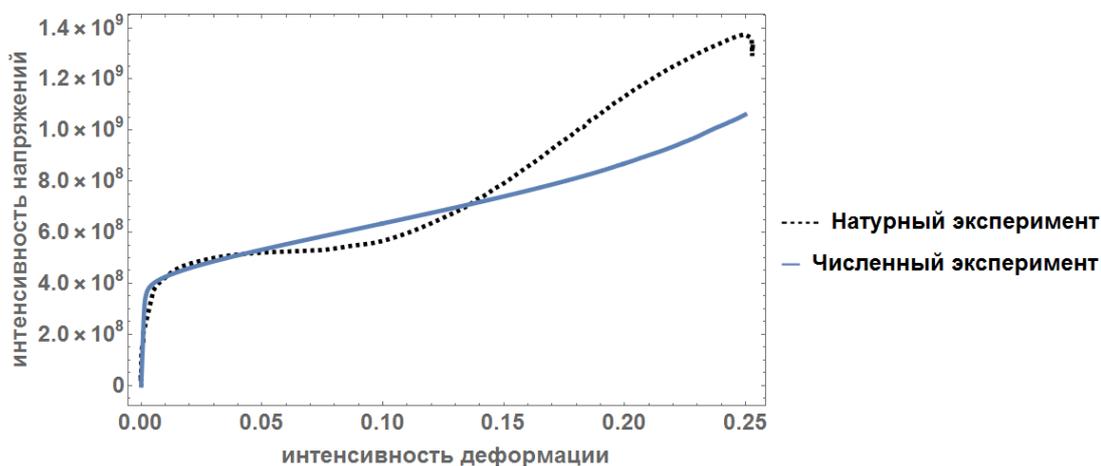


Рис. 1. Зависимость интенсивности напряжений от интенсивности накопленных деформаций для стали (точки соответствуют экспериментальным данным [3])

Доля мартенситной фазы, была сопоставлена с экспериментальными данными. Построена зависимость доли мартенсита от интенсивности накопленных деформаций (рис.2). В связи большими скоростями образования мартенсита наблюдается линейный характер роста мартенсита, который коррелирует с экспериментом.

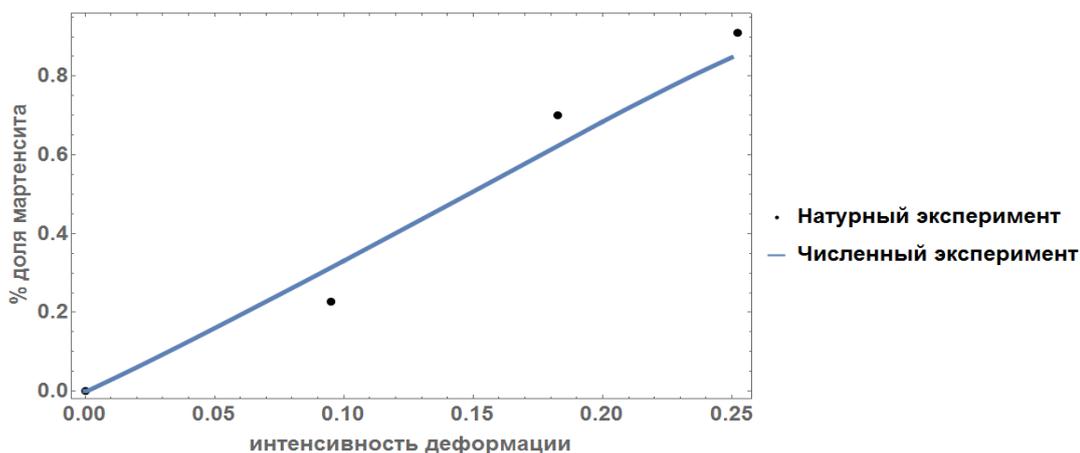


Рис. 2. Зависимость доли образовавшегося мартенсита от интенсивности накопленных деформаций для стали (точки соответствуют экспериментальным данным [3])

Литература

1. Hua D. et al. Microstructures and mechanical properties of Fe-Mn-(Al, Si) TRIP/TWIP steels //International Journal of Iron and Steel Research. – 2006. – V. 13. – №. 6. – pp. 66-70.
2. Grässel O. et al. High strength Fe-Mn-(Al, Si) TRIP/TWIP steels development—properties—application //International Journal of plasticity. – 2000. – V. 16. – №. 10-11. – pp. 1391-1409.
3. Petit B. et al. Deformation behavior and microstructure/texture evolution of an annealed 304 AISI stainless steel sheet. Experimental and micromechanical modeling //International journal of plasticity. – 2007. – V. 23. – №. 2. – pp. 323-341.

ФОРМИРОВАНИЕ КОМПОЗИТНОЙ СТРУКТУРЫ НА ГРАНИЦЕ СЛОЕВ МЕДИ И АЛЮМИНИЯ

Полякова П.В.¹, Баймова Ю.А.²

¹БашГУ, Уфа,

polina.polyakowa@mail.ru;

²ИПСМ РАН, Уфа.

Одним из важных направлений исследования в последние годы являются *in-situ* композиты, которые формируются в процессе обработки отдельных слоев металла. Механические свойства подобных систем в значительной степени зависят от формирования прочных интерметаллидных фаз, что происходит уже на стадии обработки. Поэтому исследователей особенно привлекают подобные соединения, в частности композиты, полученные на основе алюминия и меди. Однако, не все эксперименты позволяют детально изучить формирование структуры на атомистическом уровне, из-за чего исследователи все чаще прибегают к различным методам моделирования, одним из которых является метод молекулярной динамики, позволяющий детально проанализировать особенности структурных и фазовых превращений. Такие композиты имеют большие перспективы применения в различных областях науки и техники промышленности. В связи с этим целью данной работы является: исследование механических свойств композита Cu-Al методом молекулярной динамики

In recent years, one of the important spheres of research became an *in-situ* composites, which are formed during the processing of individual metal layers. The mechanical properties of such systems depend on the appearance of strong intermetallic phases, which occurs already at the processing stage. Therefore, scientists are particularly attracted to such compounds, in particular composites based on aluminum and copper. However, in experiments, peculiarities of the structural and phase transformations cannot be clearly seen step by step while they can be reproduced by various modeling techniques. Such composites have great prospects for application in various fields of science and technology. In this regard, the aim of this work is to study the mechanical properties of the Cu-Al composite by molecular dynamics.

Введение. В последнее время одним из привлекающих внимание исследователей материалов являются композиты, полученные на основе алюминия (Al) и меди (Cu) с улучшенными механическими характеристиками, поскольку подобные материалы могут применяться в авиастроении, автомобилестроении и др. Получение *in-situ* композитов можно наблюдать при кручении под высоким давлением (КГД) с последующим отжигом [1-4]. Интенсивная пластическая деформация приводит к уменьшению зерна до наноразмеров, ускоряет диффузию, влияя на формирование интерметаллидных фаз. Было показано, что такие упрочняющие интерметаллидные фазы, как AlCu, Cu₉Al₄ и Al₂Cu, могут быть получены после КГД обработки с последующим отжигом [1, 2, 3]. В экспериментах подобные особенности структурных и фазовых превращений не всегда возможно рассмотреть детально, однако это может быть воспроизведено различными методами моделирования. Метод молекулярной динамики (МД) - это мощный инструмент для изучения различных структур на атомистическом уровне, который позволяет отслеживать различные структурные и фазовые превращения при деформации или отжиге, в частности, проследить за движением атомов в системе. В данной работе рассматривается перемешивание атомов между слоями алюминия и меди, которое происходит в результате кручения под высоким давлением. В качестве дополнительной обработки, которая может привести к формированию интерметаллидных фаз выбран отжиг. Исследование проводилось методом молекулярной динамики с использованием реалистичного межатомного потенциала.

Детали моделирования. На рис. 1 показана исходная структура композита. Рассматривается две пластины Al и Cu, которые имеют гранцентрированную кубическую (ГЦК) решетку с параметром решетки соответственно $a_{Al} = 4,05 \text{ \AA}$ и $a_{Cu} = 3,615 \text{ \AA}$. Такая атомная структура сформирована путем непосредственного объединения двух совершенных кристаллов. Периодические граничные условия применяются во всех направлениях. Размеры пластин металлов выбраны таким образом, чтобы деформации, приложенные к ним, свести к минимуму, а также обеспечить периодические граничные условия и равновесие композита. Параметры решетки для кристалла Cu $L_x = 55a_{Cu}$, $L_y \approx 100a_{Cu}$ и $L_z = 8a_{Cu}$; для кристалла Al - $L_x = 49a_{Al}$, $L_y \approx 100a_{Al}$ и $L_z = 7a_{Al}$. Расстояние между двумя кристаллами составляет $2,8 \text{ \AA}$. Равновесие подразумевает, что нормальные напряжения в кристаллах равны нулю. Релаксация двухслойной модели осуществляется методом молекулярной динамики, с использованием потенциала, основанного на методе погруженного атома [5]. Благодаря применению таких условий были получены реалистичные данные для энергии диффузии и энергии образования дефектов. Во время

релаксации два кристалла способны изменяться во всех трех направлениях, но вращение не допустимо. В системе поддерживалось постоянство температуры 300 К с помощью термостата Носе-Хувера.

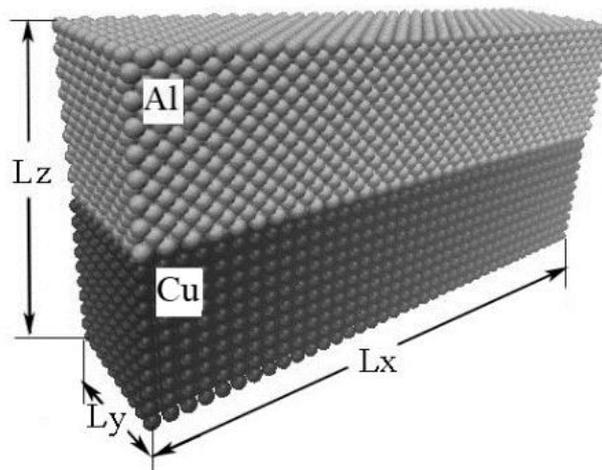


Рис. 1. Исходная структура композита Cu-Al.

Моделирование осуществляется с использованием бесплатного программного пакета LAMMPS. Для описания взаимодействия между атомами использовался межатомный потенциал EAM (embedded atom method) [5]. Для того чтобы изучить влияние деформаций и фазовых превращений на формирование композита, к структуре было приложено сжимающее давление вдоль оси z в сочетании с деформацией сдвига σ_{xy} при скоростях деформации: $\dot{\epsilon} = 0.0001; 0.0005; 0.001$. Кроме того, был проведен отжиг при 300°C и 450°C, благодаря чему ускоряется процесс фазовых превращений в данном композите.

Результаты и их обсуждение. На рис. 2а представлено распределение компонент напряжения в процессе деформации посредством одноосного сжатия вдоль оси z комбинированного с напряжением сдвига τ_{xy} . Все три компоненты напряжения σ_{xx} , σ_{yy} и σ_{zz} изменяются аналогичным образом, поэтому рассмотрена только компонента σ_{zz} .

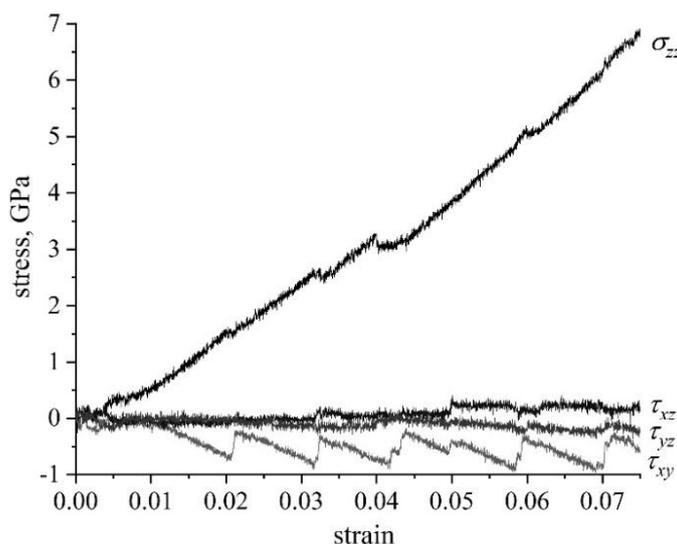


Рис. 2. Кривые напряжение-деформация.

Отрелаксированная структура обладала как положительными, так и отрицательными напряжениями. С увеличением давления обнаружен рост сжимающих напряжений. Компонента σ_{xx} отрицательна в алюминиевой части композита уже при $\epsilon_{zz} = 0.03$ для сжатия в сочетании со сдвигом, что связано с мягкостью данного металла.

На рис. 3 представлены изображения структуры в проекции на плоскость xz в начальный момент времени, после приложения давления в сочетании со сдвигом, приложенного по оси

z , при $\varepsilon_{zz} = 0.1$ и $\varepsilon_{zz} = 0.075$ соответственно. Рассмотрены только атомы меди и поскольку применяются периодические граничные условия, нижняя граница Cu показана над кристаллом Al. Как видно из рисунка, после одноосного сжатия всего несколько атомов Cu покинули свое начальное местоположение и движутся к кристаллу Al даже при $\varepsilon_{zz} = 0.01$ и $\sigma_{zz} = 10$ ГПа. Из рис. 3, где представлены снимки после отжига, можно увидеть, что атомы меди проникают еще глубже в кристалл Al. Из распределения напряжений внутри структуры видно, что дополнительное напряжение сдвига позволяет более равномерно деформировать структуру.

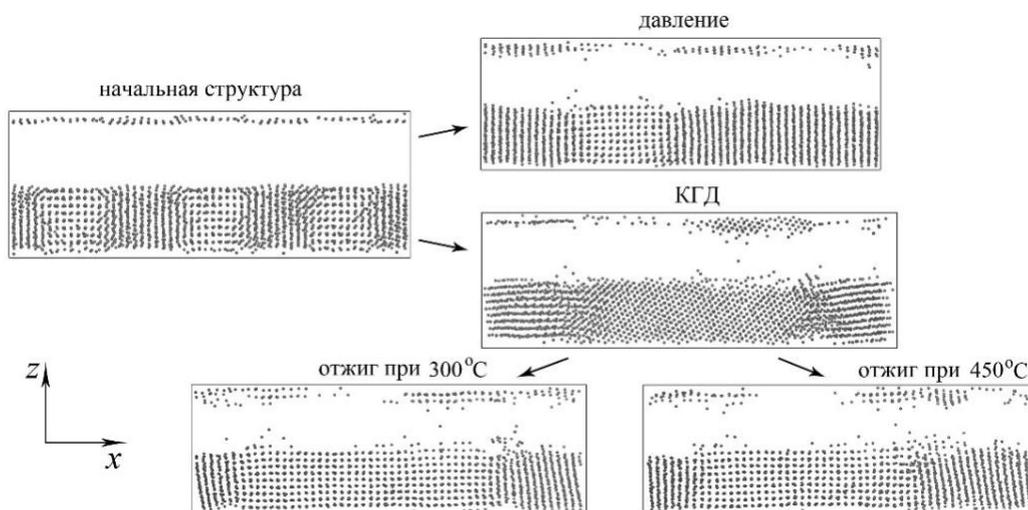


Рис. 3. Расположение атомов в процесс обработки. Показаны только атомы меди.

Закключение. Молекулярно-динамическое моделирование позволило на атомистическом уровне исследовать перемешивание атомов Cu и Al из двух первоначально разделенных кристаллов в результате сильной пластической деформации. Предложенная модель является упрощением сценария, экспериментально наблюдаемого ранее [1-4]. Однако даже такая простая модель позволяет понять механизмы, лежащих в основе формирования данного композита. Были рассмотрены две основные схемы: одноосное сжатие и сжатие в сочетании с деформацией сдвига. Можно отметить, что дополнительные сдвиговые компоненты напряжения значительно облегчают диффузионный процесс. Наилучшее перемешивание атомов Al и Cu было достигнуто после отжига при 450°C. Прделанная работа позволила выявить ряд вопросов, связанных с образованием композита Cu-Al, а именно влияние граничных условий; влияние размера кристалла, и требуемая комбинация значений сдвига и деформации сжатия, которые могут быть изучены в дальнейших работах.

Поддержано грантом Российского научного фонда № 18-12-00440.

Литература

1. Effect of annealing on the structure and phase composition of Al-Cu laminated metal-matrix composites produced by shear deformation under pressure / V.N. Danilenko, G.F. Korznikova, A.P. Zhilyaev, S.N. Sergeev, G.R. Khalikova, R.Kh. Khisamov, K.S. Nazarov, L.U. Kiekkuzhina, R.R. Mulyukov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – V. 447 P. 012 - 021.
2. Al-Cu layered composites fabricated by deformation/ G.F. Korznikova, R.R. Mulyukov, A.M. Zhilyaev, V.N. Danilenko, R.Kh. Khisamov, K.S. Nazarov, S.N. Sergeev, G.R. Khalikova, R.R. Kabirov// AIP Conference Proceedings. – 2018. – V. 2053. – P. 030-028.
3. An approach for fabrication of Al-Cu composite by high pressure torsion / V.N. Danilenko, S.N. Sergeev, J.A. Baimova, G.F. Korznikova, K.S. Nazarov, R. Kh. Khisamov, A.M. Glezer, R.R. Mulyukov // Materials Letters. – 2019. – V. 236. – P. 51-55.
4. Current achievements on superplasticity and related phenomena at the Institute for Metals Superplasticity Problems / R.R. Mulyukov, A.A. Nazarov, R.M. Imayev // Letters on Materials. – 2018. – V.8. – P. 510-516.
5. Simple analytical embedded-atom-potential model including a long-range force for fcc metals and their alloys / J. Cai and Y. Y. Ye // Physical Review B. – 1996. – V. 54 – P. 8398–8410.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ КОНВЕКТИВНОГО ФАКЕЛА ОТ СОСРЕДОТОЧЕННОГО ИСТОЧНИКА ТЕПЛА

Прохорчук К.В.¹, Якимов М.Ю.²

¹МАИ (НИУ), Москва

²ИПМех РАН, Москва

oilwserious@yandex.ru

В данной работе представлены результаты математического моделирования пульсаций конвективного факела от сосредоточенного источника тепла, эквивалентного непрерывному оптическому разряду, в ксеноне высокого давления. В расчете получены динамические распределения температуры, плотности и скорости газа вокруг области тепловыделения, показывающие образование тороидальных вихрей в зоне конвекции, приводящих к возникновению пульсации. Результаты расчета находятся в хорошем соответствии с полученными ранее экспериментальными данными.

Введение. Непрерывный оптический разряд (НОР) является одним из способов поддержания плазмы с температурой полной однократной ионизации, не требующим для подвода энергии соприкасающихся с плазмой конструктивных элементов, электродов, волноводов, индукторов и т.п. Это позволяет поддерживать плазму, например, в замкнутых колбах с инертным газом высокого давления, пропуская лазерное излучение сквозь прозрачную стенку. Этот принцип положен в основу получивших распространение в последние годы широкополосных лазерно-плазменных источников излучения высокой яркости на основе НОР [1, 2].

Одним из главных требований, предъявляемых к таким источникам, является высокая временная и пространственная стабильность излучения [3, 4]. Высокотемпературная плазма НОР вызывает в плазмообразующем газе интенсивную конвекцию, которая сопровождается характерными пульсациями конвективного факела, отрицательно влияющими на стабильность положения и яркость плазмы НОР [3, 4]. В разное время в литературе рассматривались и выдвигались в качестве основных различные физические механизмы, которые могли бы служить причиной данных осцилляций. Ссылки на основные работы даны в [1, 3, 4]. Тем не менее, основная причина осцилляций скорее связана с гидродинамикой конвективного теплоотвода, чем с особенностями взаимодействия лазерного излучения с плазмой НОР, о чем косвенно свидетельствует количественная аналогия между колебаниями конвективного потока от НОР и пульсирующими режимами горения пламени, на которую указано в работе [3].

В данной работе представлены результаты математического моделирования пульсаций конвективного факела от сосредоточенного источника тепла, эквивалентного НОР.

Постановка задачи. Конвективный факел из разогретого до высокой температуры газа образуется вокруг плазмы НОР, поддерживаемой за счет поглощения лазерного излучения. Факел формируется в результате теплопроводностного переноса тепла к окружающему газу из зоны разряда и термогравитационной конвекции. За счет этого механизма теплоотвода плазма теряет около пятой части мощности подводимого к ней лазерного излучения [1].

При математическом моделировании решалась гидродинамическая задача конвекции вокруг локального источника тепловыделения в ксеноне высокого давления (17-50 бар), находящемся в сферической кварцевой колбе диаметром 16.6/20.6 мм (внутренний/внешний), температура на наружной поверхности которой считалась постоянной. Предполагалось, что в небольшом объеме в форме вытянутого сфероида диаметром 0.3 мм и длиной 0.5 мм, находящемся в центре колбы, выделяется тепловая мощность 10 Вт. Постановка задачи в основном соответствует условиям поддержания НОР в лазерно-плазменном источнике излучения ЛПИ-50 [1].

Методы решения. Задача решалась в системе численного моделирования задач гидроаэродинамики ANSYS CFX [6]. Решалась нестационарная система уравнений Навье-Стокса для сжимаемого газа, находящегося в поле силы тяжести. Необходимые зависимости плотности, теплопроводности, теплоемкости и вязкости ксенона от температуры и давления в диапазоне от 300 °К до 15000 °К взяты из [5].

На рис. 1 в масштабе показана расчетная область и распределение скоростей конвективного потока, используемое как начальное условие для решения динамической задачи. Это распределение представляет собой решение задачи о конвективном факеле, близкое к стационарному. За счет такой постановки начальных условий удалось сократить

время вычислений, при котором успевали развиваться колебания факела, до нескольких периодов осцилляций.

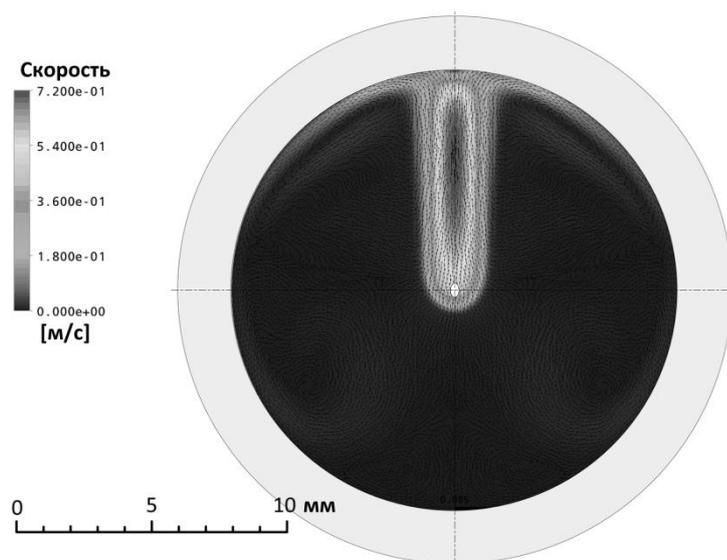


Рис.1. Начальные и граничные условия нестационарной задачи, ксенон, $p = 29$ бар. Показано начальное поле скоростей конвективного факела. Газовый объем окружен кварцевой сферой, через которую отводится тепло. Светлое пятно в центре – область энерговыделения.

Поскольку за пределами заданной малой области энерговыделения температура газа не превышала 8 кК, эффекты, связанные с наличием свободных электронов и лучистым теплообменом, не могли оказать большого влияния на результат. Поэтому при решении данной задачи они учитывались опосредованно, через задаваемые начальные и граничные условия и зависимости параметров газа от температуры.

Результаты расчетов. В расчетах получены динамические распределения температуры, плотности и скорости газа вокруг области тепловыделения при трех значениях установившегося в процессе нагрева газа в замкнутом объеме давления $p = 29; 48; 50$ бар. На рис. 2 показан процесс установления колебаний диаметра факела по изотерме $T = 3000$ °К.

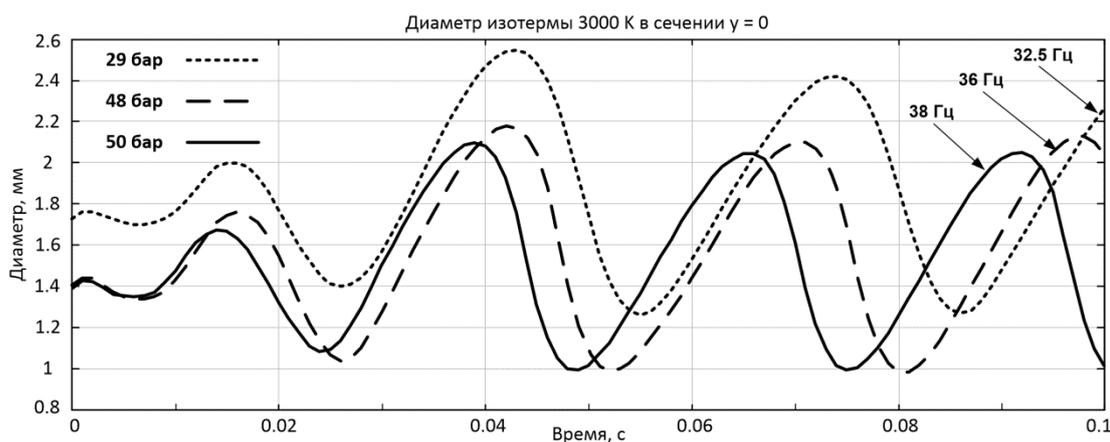


Рис. 2. Процесс установления периодически осциллирующего решения динамической задачи на примере диаметра изотермы $T = 3$ кК конвективного факела в горизонтальном сечении $y = 0$, проходящем через центр расчетной области. В левом углу указаны расчетные давления, в правом – приблизительные частоты осцилляций к концу расчетного интервала 0.1 с.

Видно, что чем выше давление, тем быстрее происходит процесс установления колебательного режима факела и тем выше установившаяся частота. Динамические расчеты

были искусственно ограничены временем 0.1 с, поскольку этого было достаточно для проверки работоспособности вычислительной модели. Тем не менее, за пределами этой области будет происходить дальнейшее установление колебательного режима, и установившаяся частота осцилляций при увеличении времени счета может измениться.

На рис. 3 а), б), в) показаны двумерные распределения, соответственно, температуры (0.5-13 кК), скорости (0-1 м/с) и плотности (3-97 кг/м³) в изолиниях градаций серого. Распределения получены при давлении $p = 29$ бар на отметке времени 0.09 с. На рис. 3, г) в том же масштабе приведена полученная теневая картина конвективного факела НОР из [3] в фазе пульсации, близкой к расчетным распределениям. Видно хорошее качественное и близкое количественное соответствие распределений рис. 3, в) и г).

На рис. 3, б) стрелками показаны направления векторов скорости газа в зоне конвекции. Кадр отображает момент зарождения тороидального вихря у нижней границы горячего газа и развитый вихрь в верхней части кадра, всплытие и отрыв которого вызывает пульсацию.

Некоторое несоответствие результатов моделирования экспериментальным данным проявляется в заниженных в расчетах частотах пульсации по сравнению с экспериментальными данными [3, 4]. Возможная причина заниженной частоты в недостаточном времени установления колебательного режима конвективного факела.

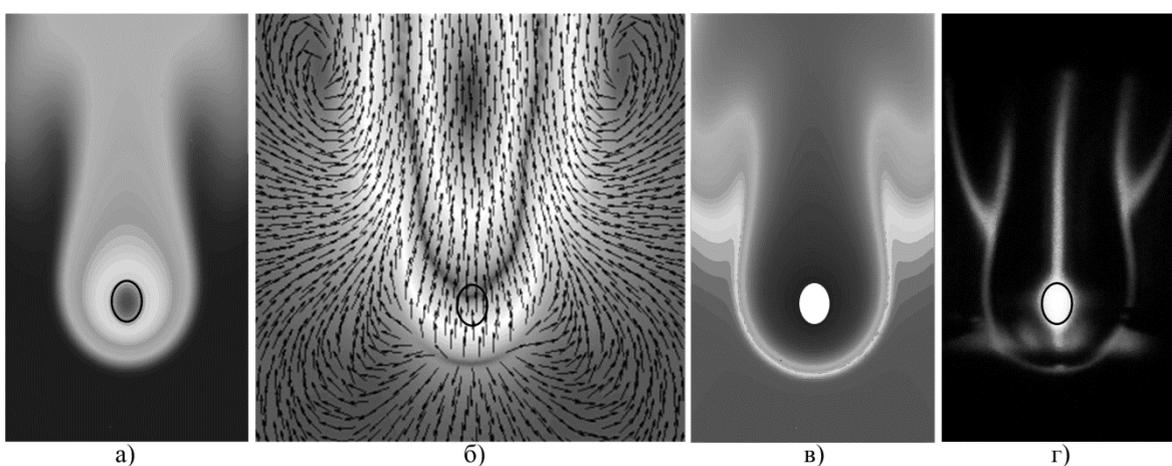


Рис. 3. Расчетные распределения а) температуры, б) скорости, в) плотности, в сравнении с г) теневым изображением из [3] (изолинии максимума градиента коэффициента преломления) конвективного факела НОР. На рис. а), б), в) эллипс 0.3×0.5 мм² показывает область энерговыделения, на рис. г) – положение плазмы НОР. Высота всех кадров 5.16 мм.

Авторы признательны Н.М. Якимову за помощь в постановке задачи и проведении расчетов. Работа выполнена по теме государственного задания № АААА-А20-120011690135-5.

Литература

1. Зимаков В.П., Кузнецов В.А., Соловьев Н.Г., и др. // Физико-химическая кинетика в газовой динамике, 2014. Т. 15(5) <http://chemphys.edu.ru/issues/2014-15-5/articles/247/>
2. Зимаков В. П., Кузнецов В.А., Соловьев Н.Г. и др. // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2016. Т. 17(2) <http://chemphys.edu.ru/issues/2016-17-2/articles/653/>
3. Зимаков В.П., Кузнецов В.А., Соловьев Н.Г. и др. // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2018. Т. 19(4) <http://chemphys.edu.ru/issues/2018-19-4/articles/754/>
4. Lavrentyev S.Yu., Solovyov N.G., Shemyakin A.N., Yakimov M.Yu. // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. V. 1394. P. 012012 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1394/1/012012/pdf>
5. Murphy A.B., Tam E. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2014. V. 47. P. 295202 (10pp) <https://doi.org/10.1088/0022-3727/47/29/295202>
6. ANSYS CFX [Электронный ресурс] <http://www.ansys.com/Products/Fluids/ANSYS-CFX> (дата обращения 20.02.2020).

АДГЕЗИОННЫЙ КОНТАКТ СМОЧЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ УПРУГИХ ТЕЛ

Рогожева А.М.

Научный руководитель — академик, д.ф.-м.н. Горячева И.Г.

МФТИ (НИУ), Москва

Rogozheva.AM@phystech.edu

Сила адгезионного притяжения поверхностей, покрытых пленками жидкости, складывается из нескольких составляющих, из которых можно выделить капиллярное давление в менисках (жидких «мостиках», стягивающих поверхности) и силы ван-дер-ваальсового межмолекулярного притяжения. Обычно влияние на контактные характеристики для упругих тел исследуется отдельно для капиллярных и межмолекулярных сил. В настоящей работе моделируется эффект одновременного действия этих сил на характеристики осесимметричного упругого контакта.

Рассматривается взаимодействие выступа параболической формы с упругим полупространством. Поверхности разделены мениском жидкости, находящимся в термодинамическом равновесии с окружающей атмосферой. Учтены две составляющих силы капиллярного притяжения между выступом и полупространством: сила, связанная с поверхностным натяжением пленки жидкости на внешней границе мениска, и сила, вызванная действием лапласовского давления в жидкости. Между поверхностями действует также сила адгезионного притяжения, обусловленная межмолекулярным ван-дер-ваальсовым взаимодействием. Молекулярное притяжение поверхностей твердых тел через водную среду моделируется потенциалом Леннард-Джонса, который учитывает как притяжение поверхностей при относительно большой толщине разделяющего их слоя жидкости, так и их отталкивание при малой толщине слоя.

Для описания упругих свойств взаимодействующих тел в адгезионном контакте используется приближение Дерягина-Муллера-Топорова (ДМТ), согласно которому адгезионные силы не влияют на напряженно-деформированное состояние взаимодействующих тел. Это приближение применимо для достаточно жестких тел, имеющих относительно малые радиусы кривизны контактирующих поверхностей.

В результате получены соотношения, позволяющие исследовать зависимости силы адгезионного притяжения между поверхностями и размера образующегося мениска от расстояния между поверхностями при различных значениях относительной влажности окружающего воздуха, поверхностных свойств взаимодействующих тел (в частности, угла смачивания жидкостью твердых поверхностей), их геометрических и механических характеристик. Показано, в частности, что сила адгезии возрастает при увеличении относительной влажности воздуха.

Полученные результаты могут применяться для моделирования взаимодействия зонда атомно-силового микроскопа с образцом во влажной атмосфере, а также для описания контактного взаимодействия шероховатых поверхностей, покрытых пленками жидкости.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 20-01-00400 а).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРА ПОВРЕЖДЕННОСТИ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ КРИВЫМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ

Саитова Р.Р.

Научный руководитель — к.ф.-м.н. Арутюнян А.Р.

СПбГУ, Санкт-Петербург

rigastr@yandex.ru

Рассматривается проблема ползучести и длительной прочности металлических материалов и сплавов. Под действием относительно низких напряжений и высоких температур металлические материалы становятся хрупкими и разрушаются с небольшой величиной остаточных деформаций. Эта проблема известна как проблема тепловой хрупкости металлов. Поскольку данный эффект наблюдается в элементах многих важных инженерных объектов, проблема хрупких разрушений стала предметом многочисленных

теоретических и экспериментальных исследований. Для решения этой проблемы в механике материалов была введена концепция поврежденности. Для описания хрупкой области экспериментальной кривой долговременной прочности была предложена система простых кинетических уравнений для параметра поврежденности и деформации ползучести, а также был сформулирован критерий длительной прочности. В работах Л.М. Качанова [1], Ю.Н. Работнова [2] и Р.А. Арутюняна [3] для решения данной проблемы рассматривается система кинетических уравнений для параметра поврежденности и деформации ползучести. В данной работе предлагается определять изменения параметра поврежденности по экспериментальным кривым высокотемпературной ползучести. При этом формулируется только одно кинетическое уравнение для скорости ползучести для случая сжимаемой среды. Параметр поврежденности определяется из рассматриваемого кинетического уравнения и зависит от скорости ползучести и деформации ползучести. Аналогичным образом изменение параметра поврежденности определяется по решению Работнова. Для описания экспериментальных кривых ползучести используются различные эмпирические зависимости в виде степенных, экспоненциальных и смешанных функций. Получены критерии длительной прочности при условии достижения параметра поврежденности критической величины. Для случая сжимаемой среды наблюдается более интенсивное накопление поврежденности и, соответственно, процессов разрушения, по сравнению с решением Работнова.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант N 18-01-00146).

Литература

1. Качанов Л.М. О времени разрушения в условиях ползучести // Изв. АН СССР. ОТН. 1958. № 8. С. 26-31.
2. Работнов Ю.Н. О механизме длительного разрушения // Вопросы прочности материалов и конструкций. М.: Изд-во АН СССР. 1959. С. 5-7.
3. Арутюнян Р.А. Проблема деформационного старения и длительного разрушения в механике материалов. СПб.: Изд-во СПбГУ. 2004. 252с.

УСТРАНЕНИЕ ФЕСТОНОВ ВО ВРЕМЯ ВЫТЯЖКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕРАВНОМЕРНЫХ ПО ПЕРИМЕТРУ РАДИАЛЬНЫХ ПОДПОРОВ-ТОЛКАТЕЛЕЙ

Самсонов Н.А.

Научный руководитель — проф, д.т.н. Ларин С.Н.

ТулГУ, каф. МПФ, Тула

Samsonovn888@yandex.ru

Вытяжка осесимметричных заготовок из различных легкосплавных материалов получали широкое распространение в авиационной и космической промышленности. Ввиду повсеместного использования и крупносерийного производства таких деталей особую роль занимает вопрос повышения коэффициента использования материала при реализации технологических процессов. Анизотропия материала заготовки для вытяжки является причиной фестонобразования, что в свою очередь ведет к существенному снижению коэффициента использования материала при вытяжке цилиндрических стаканов.

В работе рассматривается возможность устранения фестонобразования путем внедрения специализированной штамповой оснастки, позволяющей контролировать образование цилиндрической стенки при вытяжке на всех этапах деформирования. Основным принципом является регулировка величины пути при вытяжке, а так же использование специальных подпоров-толкателе, позволяющих влиять на скорость истечения материала в необходимых участках при деформировании. Стоит отметить, что основной особенностью устранения фестонобразования таким способом является решение обратной задачи: меняется не форма исходной заготовки при вытяжке, а подстраивается геометрическая конфигурация инструмента, причем в ходе исследований был предложен и спроектирован специальный автоматизированный штамп, позволяющий производить подстройку уже при изготовлении деталей. Были собраны статистические данные и проведен анализ эффективности технологического процесса вытяжки с использованием специализированного инструмента для различных типов материала

заготовки и при различных конфигурациях конечных деталей. На основании собранных данных предложена наиболее эффективная модель инструмента, позволяющая полностью устранить фестонообразование при вытяжке тонкостенных осесимметричных стаканов. На данную конструкцию штампа была подана заявка на патент, в дальнейшем предполагается исследование использования принципа изменения конфигурации матричной полости и оснастки в целом для вытяжки не только осесимметричных, но и коробчатых деталей.

Применение предложенной штамповой оснастки в авиастроении существенно повышает экономическую эффективность процессов получения тонкостенных осесимметричных корпусов и предоставляет дополнительные возможности для дальнейшей оптимизации существующих технологических процессов изготовления деталей для авиационной и космической отраслей.

Литература

1. Яковлев С.П., Яковлев С.С., Андрейченко В.А. Обработка давлением анизотропных материалов. - Кишинев: Квант, 1997.- 331 с.
2. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки. - М.: Машиностроение, 1968. - 283 с.
3. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. – Екатеринбург: Уральский государственный технический университет (УПИ), 2001. – 836 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРА НАНОЧАСТИЦ НИКЕЛЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ КОМПОЗИТА НИКЕЛЬ-ГРАФЕН

Сафина Л.Р.

Научный руководитель — профессор, д.ф-м.н. Баимова Ю.А.
БашГУ, Уфа
saflia@mail.ru

Методом молекулярной динамики исследовано получение композита на основе графена и наночастиц Ni разных размеров с использованием гидростатического сжатия при повышенных температурах (~1500 K). Наблюдается, что температура, превышающая температуру плавления наночастиц Ni, но значительно ниже температуры плавления графена, приводит к лучшему перемешиванию структурных элементов. Установлено, что одним из основных факторов при формировании композита является размер наночастиц. Более крупные наночастицы Ni, полностью покрытые графеновыми чешуйками даже при высоких температурах, сохраняют свою сферическую форму и замедляют получение композитной структуры. Наночастицы малого и среднего размера демонстрируют гораздо лучшее образование композита.

Molecular dynamics simulation is used to study the preparation of a composite based on graphene flakes and Ni nanoparticles of various sizes using hydrostatic compression at elevated temperatures (~ 1500 K). It is observed that a temperature exceeding the melting temperature of Ni nanoparticles, but significantly lower than the melting temperature of graphene, leads to better mixing of structural elements. It is established that one of the main factors in the formation of the composite is the size of the nanoparticles. Larger Ni nanoparticles, completely coated with graphene flakes even at high temperatures, retain their spherical shape and slow down the preparation of the composite structure. Small and medium sized nanoparticles exhibit much better composite formation.

Введение. Композиты на основе полиморфов углерода и наночастиц металлов имеют малый вес, высокую жесткость и превосходные механические свойства, которые могут играть важную роль для разработки различных современных материалов [1-3]. Один из вариантов углеродных структур, подходящих для заполнения наночастицами металлов, является скомканный графен, применение которого в последнее время активно исследуется в энергетике и других областях [4-6]. Такая структура представляет собой пористый материал, состоящий из смятых, скомканных листов графена разного размера, соединенных между собой силами Ван-дер-Ваальса. Выбор наночастиц Ni в качестве наполнителя для скомканного графена является довольно очевидным, поскольку структуры никель-графен рассматриваются в качестве перспективных материалов и их взаимодействие хорошо исследовано.

Целью настоящей работы является изучение методом молекулярной динамики влияния размера наночастиц Ni на формирование композита, оценка деформационного поведения и структурных изменений композита графен-никель. Моделирование проводится с использованием широко известного потенциала Морзе. Для того, чтобы сформировать композит, прикладывается гидростатическое сжатие до максимально возможных плотностей

при повышенных температурах. Чтобы оценить прочность и механические свойства полученных композитов проводится испытание на гидростатическое растяжение.

Методы. Рассматриваются наночастицы Ni разного размера, состоящие из 21, 47 и 78 атомов. Все наночастицы Ni обернуты чешуйкой графена, вырезанной из малой углеродной нанотрубки. Минимальное количество атомов никеля – 21, наночастицы меньшего размера могут являться неустойчивыми кластерами. Наибольшее количество атомов никеля – 78, что является максимально возможным размером наночастицы, так, чтобы вся полость графеновой чешуйки была заполнена. В итоге диаметр частичек Ni₂₁, Ni₄₇ и Ni₇₈ составил 5.5, 8.4 и 9.5 Å соответственно. Трехмерная структура создавалась повторением 4×4×4 структурных единиц вдоль направлений x, y и z соответственно (рис. 1б). Чешуйки, заполненные наночастицами, были ориентированы в пространстве случайным образом. Во всех случаях использовались периодические граничные условия вдоль направлений x, y и z.

К начальной структуре прикладывается гидростатическое сжатие до максимально допустимых плотностей (рис. 1в). Гидростатическое сжатие можно проводить при нулевой или комнатной температуре, но для облегчения образования новых связей сжатие начальной структуры проводят при 1500 К. Новые ковалентные связи появятся из-за тепловых колебаний. Чтобы оценить прочность полученного композита, следующим этапом проведено испытание материала на гидростатическое растяжение.

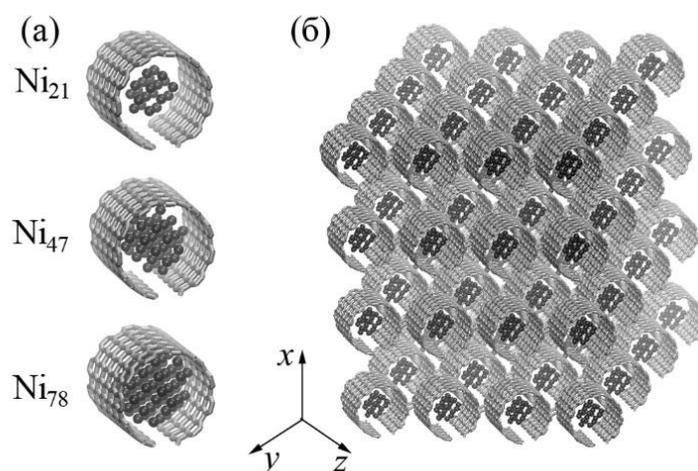


Рис.1. (а) Свернутый лист графена, заполненный наночастицами никеля разного размера; (б) начальная структура скомканного графена, содержащего частицы Ni₂₁.

Численные эксперименты проводились в свободно распространяемом пакете молекулярно-динамического (МД) моделирования LAMMPS. Одним из простых и при этом эффективных потенциалов межатомного взаимодействия является потенциал Морзе. Он широко применяется в моделировании различных материалов и соединений. Для описания взаимодействия атомов Ni-Ni были выбраны параметры, предложенные в работе [9]: $D_e = 0.4205$ eV, $\beta = 1.4199$ 1/Å и $R_e = 2.78$ Å. Взаимодействия атомов Ni-C описывались параметрами: $D_e = 0.433$ eV, $\beta = 3.244$ 1/Å и $R_e = 2.316$ Å, полученными методом *ab-initio* и предложенные в [10]. Модель с потенциалом Морзе позволяет получать реалистичные (наблюдаемые в эксперименте) равновесные формы структур. Взаимодействие между атомами углерода описывается потенциалом AIREBO.

Результаты. На рис. 2а приведены соответствующие кривые зависимости напряжения от плотности после гидростатического сжатия. Ni₂₁ легко плавится и распределяется по плоскости графена. Конечная плотность после сжатия до $\epsilon = 0.3$ является самой низкой и равна примерно 5 г/см³ при самых низких требуемых напряжениях.

В случае с наночастицей Ni₄₇ структура может быть сжата до 6.45 г/см³. Из вставки к рис. 2а можно заключить, что Ni₄₇ рассматривается как промежуточный случай между Ni₂₁ и Ni₇₈. С одной стороны, некоторые чешуйки значительно смялись, что облегчало формирование композита, с другой стороны, некоторые наночастицы сохранили свою форму. Наибольшая плотность достигается для структуры с Ni₇₈ из-за высокой плотности металлических частиц.

На рис. 2б представлены кривые напряжения-деформации при гидростатическом растяжении. Следует отметить, что гидростатическое растяжение проводится при 0 К. Как видно, кривые для структур с Ni_{21} и Ni_{47} близки друг к другу. Максимальное значение напряжения составляет 300 ГПа, а для Ni_{78} максимальное напряжение почти в два раза больше. Из вставки к рис. 2б видно, что при растяжении чешуйки графена, заполненные наночастицами никеля могут быть легко отделены друг от друга. Крупные поры появляются по всей структуре равномерно.

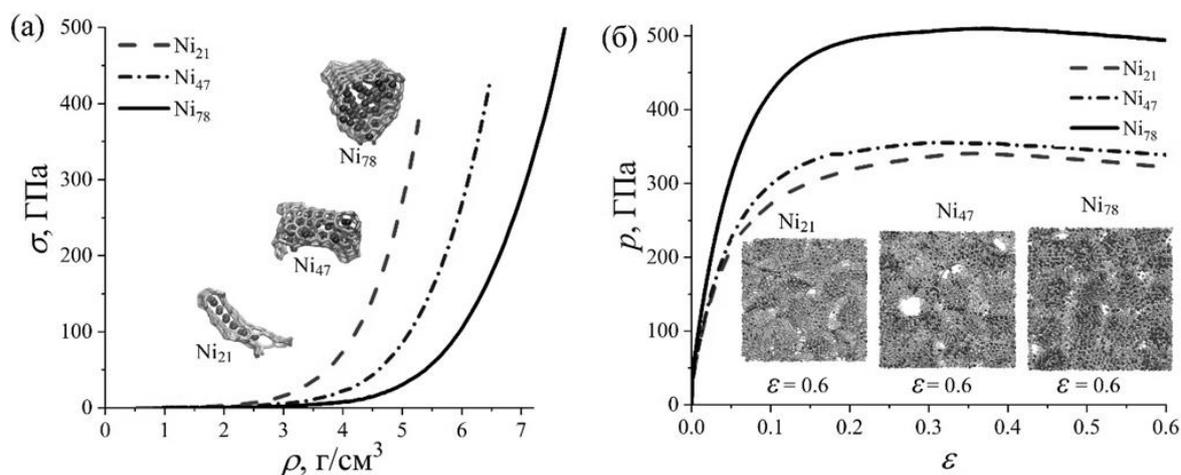


Рис.2. (а) Кривые зависимости напряжения от плотности после гидростатического сжатия при 1500 К; (б) кривые давление-деформация и структуры композитов при растяжении.

Для композита с наночастицами Ni_{21} атомы Ni свободно распространяются внутри пор и не замедляют взаимодействие между отдельными графеновыми чешуйками, что приводит к образованию композитной структуры. Промежуточный случай Ni_{47} демонстрирует такое же механическое поведение, но при растяжении можно наблюдать гораздо больше пор $\epsilon = 0,6$. Таким образом, для получения хорошего композита лучше выбирать небольшие наночастицы, которые будут лучше распределяться в структуре.

Выводы. Методом молекулярной динамики изучено формирование композита на основе чешуек графена и наночастиц Ni разного размера. Композитная структура была получена гидростатическим сжатием при высоких температурах 1500 К, которые позволяют расплавить наночастицы Ni и образование в графене ковалентных связей. Основным рассматриваемым фактором является размер наночастиц внутри пор смятого графена. Для структур с большими наночастицами (Ni_{78}) чешуйка графена полностью покрывает металлическую наночастицу, что приводит к гораздо большим трудностям в образовании химических связей между соседними чешуйками, чем для структуры с наименьшим числом наночастиц (Ni_{21}). Небольшие наночастицы растекаются по смятым порам графена, что приводит к лучшему перемешиванию структурных элементов.

Литература

1. Neubauer E., Kitzmantel M., Hulman M., et al. Potential and challenges of metal-matrix-composites reinforced with carbon nanofibers and carbon nanotubes. *Compos. Sci. Technol.*, 2010, 70, 2228–2236.
2. Shiozawa H., Briones-Leon A., Domanov O., et al. Nickel clusters embedded in carbon nanotubes as high performance magnets. *Sci. Rep.*, 2015, 5, 15033.
3. Hu Z., Tong G., Lin D., et al. Laser sintered graphene nickel nanocomposites. *J. Mater. Process. Technol.*, 2016, 231, 143–115.
4. Zhang L., Zhang F., Yang X., Long G., Wu Y., et al. Porous 3D graphene-based bulk materials with exceptional high surface area and excellent conductivity for supercapacitors. *Sci. Rep.*, 2013, 3, 1408.
5. Krylova K.A., Baimova J.A., Mulyukov R.R. Effect of deformation on dehydrogenation mechanisms of crumpled graphene: molecular dynamics simulation. *Lett. Mater.*, 2019, 9(1), 81–85.
6. Baimova J. A., Liu B., Dmitriev S.V., Zhou K. Mechanical properties of crumpled graphene under hydrostatic and uniaxial compression. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2015, 48(9), 095302.
7. Safina L.R., Baimova J.A., Mulyukov R.R. Nickel nanoparticles inside carbon nanostructures: atomistic simulation. *Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes*, 2019, 5(2), 1–11.
8. Orekhov N. D. and Stegailov V. V. Molecular-dynamics based insights into the problem of graphite melting. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2015, 653, 012090.

9. Girifalco L. A., Weizer V. G. Application of the Morse potential function to cubic metals Physical Review, 1959, 114, 687-690.

10. Stuart S.J., Tutein A.B., Harrison J.A. A reactive potential for hydrocarbons with intermolecular interactions. J. Chem. Phys., 2000, 112, 6472-6486.

РАЗВИТИЕ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ МАТЕРИАЛА ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Стратула Б.А.

Научный руководитель — профессор, д.ф.-м.н. Никитин И.С.

МАИ, Москва

stratula@matway.net

В настоящее время принято для оценки усталостной долговечности прибегать к критериям и моделям усталостного разрушения, которые позволяют оценить число циклов до, обычно, зарождения трещины.

Как правило, после зарождения трещины при циклическом нагружении время жизни детали крайне мало. Однако, бывают ситуации, когда вследствие нетривиальной формы детали либо ещё каких-то особенностей трещина, зародившись, испытывает трудности в продвижении. Для изучения таких вариантов необходимо не только оценивать жизнь детали до зарождения трещины, но и моделировать её последующий рост.

В работе предложено учесть как зарождение трещины, так и её продвижение. Для осуществления этого мы используем модель повреждаемости материала, разработанную Лемэтром и Шабошем [1]. Данная модель предполагает, что каждый элементарный объём материала обладает параметром, называемым повреждаемостью. Начинаясь от 0, когда механические свойства объёма идентичны исходному материалу, он со временем, будучи подвергнут разнообразным нагружениям, растёт и в конечном итоге достигает 1, когда его механические свойства обнуляются. С этого момента данный элементарный объём можно исключить из тела, что равнозначно трещине на его месте.

Для оценки работоспособности такого метода применительно к задачам циклического разрушения была разработана собственная модель, использующая идеологию исходной и модификации из статьи Марми и др. [2], учитывающая циклическую природу нагружения. Для численной симуляции был использован ANSYS и написанная для него подпрограмма, использующая нашу модель.

Литература

1. Lemaitre J., Chaboche J.-L. Mechanics of solid materials. New ed. Cambridge University Press; 1994.
2. Marmi A.K., Habraken A.M., Duchene L. Multiaxial fatigue damage modelling at macro scale of Ti-6Al-4V alloy. International Journal of Fatigue, V. 31, 2009, pp 2031-40.

ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ НА РАЗМЕРЫ ЗЕРНА В ЦИНКОВОМ ОБРАЗЦЕ

Сычев А.С.

Научный руководитель — д.ф.-м.н. Ченцов А.В.

МАИ, Москва

sasa300498@yandex.ru

Термообработка цинка и его сплавов требуется для придания особых свойств конечному изделию. В данном случае термообработкой регулируем размеры зерна. Целью работы является поиск особого температурного режима для достижения требуемого размера зерна в микроструктуре образца.

На размеры зерна влияют такие параметры как степень предварительной деформации и температура обработки.

Считается, что цинк проявляет пластические свойства в интервале от 100 до 150. Дальнейший нагрев возвращает хрупкие свойства материалу [1]. Однако судя по кривым деформации, пластические свойства проявляются и при более низких температурах. Эта перемена свойств происходит из-за рекристаллизации – процесса роста новых зерен за счет старых. В ходе эксперимента сначала проведен равномерный нагрев для снятия напряжений, внесенных при изготовлении, а также для изменения начального размера зерен, затем резкое

охлаждение для фиксации зерен. Затем произведено одноосное растяжение для построения графиков пластических деформаций для дальнейшего анализа и сравнения. Растяжение проводилось как до полного разрушения, так и до внесения определенной деформации. Образцы второго типа нагружения после подверглись повторной термообработке и полному разрыву для анализа влияния предварительных деформаций на размеры зерен и свойства материала.

Результаты показали, что данный метод термообработки действительно позволяет регулировать размеры зерна для дальнейшего анализа. А повторно обработанные образцы частично восстановили пластические свойства.

Литература

1. Кудрявцев И.В. Материалы в машиностроении. Выбор и применение. Москва. Изд-во Машиностроение, 1967, Т. 1. С. 263.

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО РАДИАЛЬНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Тесаков Д.М.

Научный руководитель — проф, д.т.н. Черняев А.В.

ТулГУ, каф. МПФ, Тула

arjielin@rambler.ru

В современной авиационной промышленности уделяется особое внимание расширению технологических возможностей производства составных частей авиационной техники, обладающих сложными конструктивными характеристиками. Такие детали, как правило, изготавливаются из высокопрочных легких алюминиевых и титановых сплавов. При работе с подобными материалами необходимо в полной мере учитывать особенности и физико-механические характеристики каждого типа материалов. Кроме того, важным аспектом является возможность сокращения технологических операций и переходов при производстве рассматриваемых изделий.

Целью работы является анализ и разработка оптимальной технологии изготовления патрубков с местным утолщением стенки с использованием способа радиального выдавливания заготовки. Детали, получаемые с помощью рассматриваемого способа выдавливания, имеют ряд преимуществ перед существующими аналогичными технологиями изготовления патрубков: сокращение минимального числа технологических переходов, необходимых для получения готового изделия; повышение прочностных и эксплуатационных характеристик изделия в процессе деформирования; высокий коэффициент использования материала и т.д. Изотермическое радиальное выдавливание, как технологическая операция, позволяет использовать предельные возможности формоизменения материала, в том числе и труднодеформируемых алюминиевых и титановых сплавов, что, в свою очередь, расширяет эксплуатационные возможности при использовании изготовленных деталей в авиационной промышленности.

Ключевой задачей при разработке технологического процесса получения патрубков с местным утолщением являлось получение перемены на внутренней поверхности в ходе изотермического выдавливания за одну операцию. Проводился анализ предельных возможностей формоизменения заготовки в рассматриваемом процессе для нескольких материалов. Установлены предельные и оптимальные геометрические размеры утолщения стенки заготовки, а так же определены наиболее эффективные скоростные параметры движения рабочего инструмента и температура деформации. На основании полученных результатов планируется построение регрессионной модели изотермического радиального выдавливания патрубков с местным утолщением.

По проведенным расчетам можно сделать вывод, что внедрение предлагаемого технологического процесса в существующий технологический цикл производства авиационной техники может оказать существенный экономический эффект и увеличить производительность труда при производстве деталей ответственного назначения.

Литература

1. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука. 1979. 744 с.
2. Изотермическое формоизменение анизотропных материалов жестким инструментом в режиме кратковременной ползучести / С.С. Яковлев, С.П. Яковлев, В.Н. Чудин, В.И. Трегубов, А.В. Черняев. М. Изд-во «Машиностроение», 2009. 412 с.

ВЫБОР РОВИНГОВОЙ ТКАНИ С ПРОПИТКОЙ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ПРОЦЕССАХ ГОРЯЧЕЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ

Тимофеев В.В., Петров М.А.
Московский Политех, каф. «ОМДиАТ», Москва
timofeevthe@gmail.com

В данном исследовании определяются свойства ровинговой ткани с пропиткой, представляющей собой совокупность не диффузионно-связанных материалов. Такой материал должен обеспечивать определённые трибологические условия, которые являются достаточными и необходимыми для условий горячей объёмной штамповки жаропрочных сталей и титановых сплавов.

Ключевые слова: трибологические условия, теплоизоляционное покрытие, ровинговая ткань с пропиткой, стеклоткань, горячая объёмная штамповка.

This study determines the properties of impregnated roving fabric, which is a combination of non-diffusion-related materials. Such kind of material should provide a certain tribological conditions, which are sufficient and necessary for hot bulk forging processes of heat-resistant steels and titanium alloys.

Key words: tribological conditions, heat-insulating coating, impregnated roving fabric, glass fiber, hot bulk forging.

Исследования свойств тканей с пропиткой. В процессе штамповки в зависимости от толщины слоя смазочного вещества (СВ) возможны три основных вида трения (сухое трение, граничное трение и жидкостное трение), а также смешанные виды трения (полусухое и полужидкостное) [1, 2]. На практике невозможно поддерживать режим жидкостного трения в течение всего процесса штамповки без применения специальных схем. В процессе обычного деформирования смазка постепенно выдавливается и жидкостное трение переходит в режим граничного трения. Эффект Ребиндера оказался весьма важным для совершенствования процессов обработки материалов давлением (ОМД), в частности, штамповки, которая практически всегда осуществляется со СВ. Процессы ОМД, особенно труднодеформируемых металлов и сплавов, существенно облегчаются при добавлении в СВ поверхностно-активных веществ (ПАВ) или веществ, аналогично ведущих себя при высоких температурах (например, расплавы стекла и солей), которые по рассмотренному выше механизму размягчают и пластифицируют поверхностные слои деформируемого металла. При этом обрабатываемый металл как бы смазывает сам себя, локализуя в поверхностном пластифицированном слое избыточную сдвиговую деформацию, обусловленную действием сил трения. Таким образом, действие жидких и твердых СВ сводится к тому, чтобы существенно снизить неравномерность деформации, чтобы сила штамповки почти полностью расходовалась на полезную работу пластической деформации, а потери на трение, т.е. потери на создание дополнительной сдвиговой деформации поверхностного слоя металла, при этом были минимальны. Цель исследования состояла в выборе ровинговой ткани (РТ) и определении её свойств после пропитки, которая может быть использована для штамповки труднодеформируемых жаропрочных сплавов. Результаты выбора материала пропитки и связующего представлены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнительные характеристики смазочных материалов пропитки.

Физические свойства материала	Эмульсия графитовая (№1)	Вода-графит (№2)	Вода-Нитрид бора (№3)
Плотность, при 20°C, г/см ³	~ 1,280	~ 1,140	~ 0,980
Вязкость, чаша Форда №4, с	~ 48	~ 35	~ 12
Температура вспышки, °C	> 250	н/д	н/д
pH	8	8 – 11	7
Сухой остаток, %	40	29 – 32	27
Размер антиадгезионных частиц, мкм	< 4		

Данные таблицы для пропиток графитовой эмульсии и вода-графит были взяты из открытых источников [3, 4]. Данные по пропитке вода-нитрид бора были получены самостоятельно в лаборатории. Данные по свойствам выбранных стеклотканей, подходящих для высокотемпературной штамповки, представлены в таблице 2. Некоторые значения параметров были взяты из открытой литературы [5 – 9]. Такие параметры, как осажденный графит на стеклоткани, температура размягчения и другие определялись самостоятельно. Наилучшая адгезионная способность пропитки к РТ, т.е. отсутствие свободного осыпания при изгибе РТ, была достигнута на пропитке №1. На рисунке 1 представлены снимки поверхности стеклотканей с пропиткой №1 на разных увеличениях.

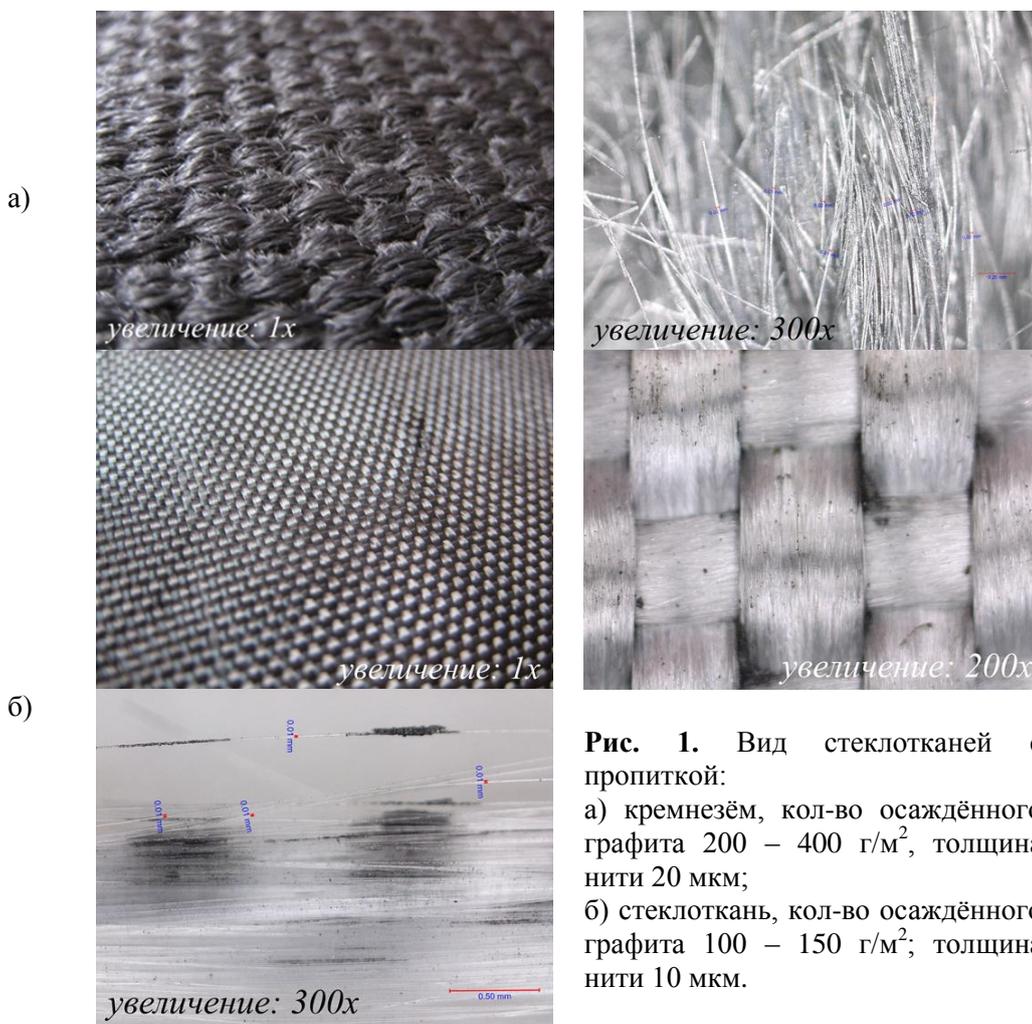


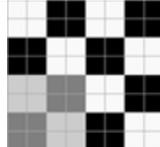
Рис. 1. Вид стеклотканей с пропиткой:

- а) кремнезём, кол-во осаждённого графита 200 – 400 г/м², толщина нити 20 мкм;
- б) стеклоткань, кол-во осаждённого графита 100 – 150 г/м²; толщина нити 10 мкм.

На рисунке 2 приведён вид стеклоткани после высокотемпературного нагрева. Видно, что отдельные нити и волокна ткани консолидировались, спеклись друг с другом. Температура размягчения не была достигнута вплоть до 1 200°C. При более высоких температурах испытания не проводились, так как температура штамповки рассматриваемых сплавов лежит ниже температуры проведения эксперимента.

Исследование поведения ткани с пропиткой при штамповке. Эксперименты по горячей объёмной штамповке с применением первоначально разработанной РТ с графитовой пропиткой был проведён с применением РТ по ГОСТ 17139-2000 (данные в таблице 2 отсутствуют). Заготовки массой 380 кг из жаропрочных сплавов ЭП698 и ЭП742, нагретые до температуры 1 150°C, деформировались на гидравлическом прессе. Температура подогрева инструмента составляла 400°C. Ровинговую ткань укладывали в два слоя под углом 90° на поковку и в один слой на нижний инструмент (матрицу). В результате такого термомеханического нагружения ровинговая ткань разрушалась в процессе деформирования основного материала поковки. Это указывало на необходимость выбора более прочного и температуростойкого типа ткани.

Таблица 2. Характеристики выбранных стеклотканей с пропиткой.

Физико-механические свойства	Стеклоткань Т13 (ГОСТ 19170-73)	Кремнезём (ГОСТ Р 56212-2014)
Тип стекла	Е (без бора) (ШСБ)	Кремнезём (К11ТР)
Тип плетения	ровинг	
Химический состав, масс %	SiO ₂ – Al ₂ O ₃ – CaO – MgO – B ₂ O ₃	SiO ₂ менее 95 %
Толщина ткани, мм	0,27 ± 0,03	2,0 – 2,5
Тип плетения: а – полотняное (1/1); б – рогожка.		
Плотность, г/см ³	2,62	2,15
Поверхностная плотность без пропитки, г/м ²	285 ± 9	1 400
Осажденный графит на стеклоткани, г/м ²	100 – 150	300 – 400
Поверхностная плотность с пропиткой, г/м ²	333 ± 15	1 700
Коэффициент линейного расширения, 10 ⁻⁶ С ⁻¹	6	0,54
Модуль растяжения (упругости), ГПа	80 – 81	69 – 74
Предел прочности при растяжении, МПа	3 100 – 3 500	3 400
Предельная деформация (удлинение до разрыва) ε, %	4,6	5
Температура размягчения	916	> 1 200
Температура плавления, °С	1 200	1 670
Пропитка	эмульсия графитовая	



а)



б)

Рис.2. Кремнезёмная ткань: а) в процессе нагрева до верхнего значения температуры штамповки; б) после нагрева.

Выводы и перспективы. Дальнейшие работы предполагается проводить на более прочных стекловолоконных тканях кремнезёмного типа, характеристики которых показаны в таблице 2. Применение в качестве основы высокотемпературного стеклянного волокна вместе с дополнительной пропиткой №1 (эмульсия графита) даёт возможность использовать материал не только в качестве огнеупорного/теплоизолирующего (с температурой эксплуатации до 1 300°С – 1 400°С) покровного материала, но и позволяет утверждать о потенциальном снижении трения на контактной поверхности с инструментом.

Соответственно, это снизит износ и увеличит стойкость штамповой оснастки [10]. Также применение РТ с пропиткой позволит получить более качественную поверхность, обеспечить лучшую теплозащиту заготовки, уменьшить вероятность залипания заготовки в штампе и засорение гравюры штампа излишками графита, что также положительно влияет на повышение стойкости штампового инструмента. Предполагается проведение численного моделирования процесса горячей объёмной штамповки с усреднённым значением фактора трения, выбранного для описания РТ с графитовой пропиткой.

Литература

1. Абрамов А.Н. Оценка трибологических свойств технологических смазочных материалов / А.Н. Абрамов, В.Ю. Шолом, Л.Ш. Шустер // Кузнечно-штамповочное производство. 1996. - №10. - С.8-12.
2. Калпин Ю.Г. Определение коэффициента трения при горячей изотермической осадке / Ю.Г. Калпин, Г.В. Елисеев // Известия вузов. Машиностроение. 1976. №5. С.157-160.
3. Атрошенко А.П. Горячая штамповка труднодеформируемых материалов /А.П. Атрошенко, В.И. Федоров. Л.: Машиностроение, 1979. - 287с.
4. Барыкин Н.П. Высокотемпературные смазочные материалы для горячей обработки металлов давлением / Н.П. Барыкин, А.Х. Валеева, И.Ш. Валеев // Кузнечно-штамповочное производство и Обработка металлов давлением,-2004.-№10.-С. 34-35.
5. Дудеров И.Г., Матвеев Г.М., Суханов В.Б. Общая технология силикатов. - М.: Стройиздат, 1987. – 560с.
6. Солнцев С.С. Защитные технологические покрытия для горячей обработки давлением сталей и сплавов /С.С. Солнцев, В.А. Розененкова, Н.А. Миронова //Стекло и керамика. 2007. №6. - С.24-27.
7. Technical Data Sheet and Material Safety Data Sheet, Condatu 51, www.condat.com.
8. ТУ 0258-045-73103972-2018
9. ГОСТы: 56212-2014, 17139-2000, 19170-73.
10. Петров А.Н. Повышение стойкости штампов при горячей штамповке путем изыскания оптимальных технологических смазок на водной основе: дис. . канд. техн. наук: 05.03.05 / Московский государственный технический университет «МАМИ» М., 1988. – 142 л.

ОТБОРТОВКА ОТВЕРСТИЙ В ТРУБНЫХ ЗАГОТОВКА С ПОМОЩЬЮ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СИЛ

Тихомолов А.А.

Научный руководитель — к.т.н. Васильева А.В.
РГАТУ им. П.А.Соловьёва, Рыбинск
antontix666@mail.ru

В условиях современного рынка, применение технологий изготовления деталей, позволяющих существенно экономить энергозатраты, стоимость материала а также дорогостоящего оборудования является одним из приоритетных направлений.

Обработка материалов давлением является распространенным методом получения заготовок различной конфигурации и назначения, и обладает рядом преимуществ перед другими способами изготовления. В частности, позволяет существенно улучшить механические и эксплуатационные характеристики полученных деталей, не требует затрат на дополнительную обработку деталей, существенно экономит расход материала, позволяет получать точные и качественные детали.

Однако, как и во всяком заготовительном производстве, для изготовления деталей методами давления, требуется применение дорогостоящего оборудования, а именно, кузнечно – прессового оборудования, и специальной штамповой оснастки. Поэтому развитие новых способов и технологических процессов изготовления деталей, позволяющих значительно экономить на оборудовании, материале и трудозатратах, при сохранении качества, полученных деталей, является одним из перспективных направлений.

В докладе представлен метод получения отбортованных отверстий в трубных заготовках, который не требует применение специального кузнечно - прессового оборудования и дорогостоящей штамповой оснастки, и может быть технически реализован в специальном приспособлении, установленном на устройстве или станке, способном передавать вращательное движение этому приспособлению с установленной трубной заготовкой.

В приспособление в виде цилиндрической обоймы-матрицы устанавливается трубная заготовка. Она центрируется на пуаносодержателе, в который установлен пуансон с полиуретановой подушкой для пробивки и отбортовки отверстия. Приспособление устанавливается в устройство, способное передать вращательное движение, например патрон токарного станка.

Под действием центробежной силы пуансон выполняет технологическую операцию пробивки и отбортовки отверстия.

В ходе работы был выполнен расчет основных технологических параметров процесса, в частности, определены центробежные усилия, необходимые для выполнения пробивки и отбортовки отверстия, рассчитано необходимое число оборотов, выполнены расчеты элементов конструкции приспособления.

ИЗМЕНЧИВОСТЬ МОДУЛЯ ЮНГА ДЛЯ 6-ТИ И 7-МИ КОНСТАНТНЫХ ТРИГОНАЛЬНЫХ КРИСТАЛЛОВ

Ткаченко В.Г.^{1,2}, Лисовенко Д.С.²

¹МФТИ, Москва

²ИПМех РАН, Москва

tkvalent@mail.ru

В работе проанализирована изменчивость модуля Юнга шести и семиконстантных тригональных кристаллов. Получены выражения экстремальных значений для модуля Юнга. Выявлены кристаллы с высокой и слабой степенью анизотропии. Исследована изменчивость упругих характеристик 6-ти и 7-ми константных тригональных материалов, а именно модуль Юнга по значениям коэффициентов податливости, экспериментальные данные которых приведены в справочнике Ландольта-Бернштейна. Матрицы коэффициентов податливости для случая семи- и шестиконстантных тригональных кристаллов имеют вид

$$\begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & s_{14} & s_{15} & 0 \\ & s_{11} & s_{13} & -s_{14} & -s_{15} & 0 \\ & & s_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & s_{44} & 0 & -2s_{15} \\ & & & & s_{44} & 2s_{14} \\ & & & & & 2(s_{11} - s_{12}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & s_{14} & 0 & 0 \\ & s_{11} & s_{13} & -s_{14} & 0 & 0 \\ & & s_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & s_{44} & 0 & 0 \\ & & & & s_{44} & 2s_{14} \\ & & & & & 2(s_{11} - s_{12}) \end{pmatrix}$$

Для тригональных кристаллов получены аналитические выражения для стационарных значений модуля Юнга и дан их численный анализ. Проанализировано 103 элемента, имеющих шесть независимых коэффициентов податливости и 7 элементов, имеющих семь независимых коэффициентов податливости.

Для 7-ми константных материалов получено четыре стационарных значения, два из которых имеют простой вид. Оставшиеся два имеют сложный характер, нахождение углов Эйлера которого сводится к решению бикубического уравнения. Для каждого стационарного значения проведено исследование достаточного условия экстремума функции двух переменных. Аналогичные результаты получены для более симметричных кристаллов с 6 независимыми коэффициентами. Также приведены данные по степени анизотропии кристаллов, показывающий отношение глобального максимального к глобальному минимальному значению модуля Юнга.

Наибольший интерес представляют вещества с высокой степенью анизотропии, а также, наоборот, вещества с малой степенью анизотропии, которые в некотором приближении можно считать изотропными. Отдельно выделены важные для приложения кристаллы, для которых построены зависимости модуля Юнга от двух углов ориентации Эйлера. На Рис.1 представлен пример поверхности модуля Юнга для $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ кристалла.

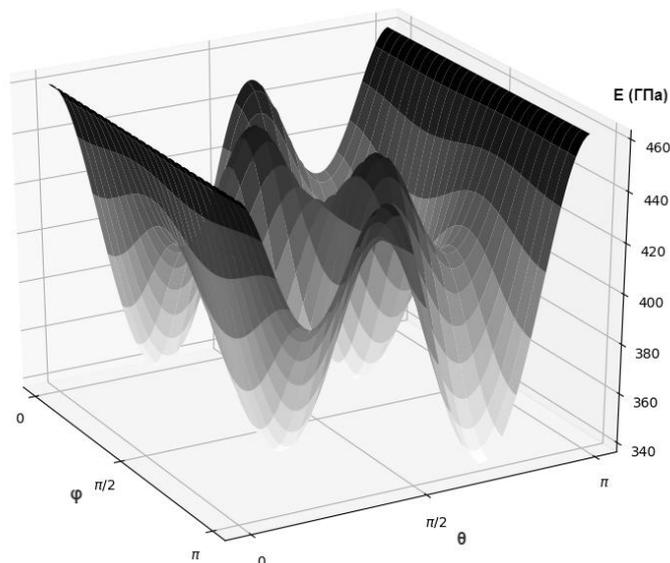


Рис.1. Поверхность модуля Юнга для кристалла $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$.

Работа частично поддержана грантом РФФИ №20-31-70035 и средствами государственного бюджета по госзаданию АААА-А20-120011690136-2.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СЕН-ВЕНАНА-ПИКАРА-БАНАХА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НДС ПОЛОСЫ ИЗ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Томашевский А.С.

Научный руководитель — профессор, д.т.н. Зверьев Е.М.
ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, Москва
al.tomashevsky@gmail.com

В работе рассматривается аналитическое решение задачи по поиску НДС полосы из композиционного материала. Для построения решения данной задачи воспользуемся итерационным методом Сен-Венана-Пикара-Банача. Часть неизвестных задается в качестве величин начального приближения, а по ним вычисляются остальные неизвестные. По последним можно вычислить ранее заданные в первом приближении. Итерационный процесс может быть продолжен. Асимптотическая сходимость метода по малой относительной толщине имеет место в силу известной теоремы Банача о неподвижной точке.

При построении решения использовались уравнения плоской задачи теории упругости, а также соотношения упругости. Решение строится в двумерных координатах (x, z) .

Далее данные уравнения приводятся к безразмерному виду. Порядок постановки уравнений таков, что при заданных величинах начального приближения, вычисленные неизвестные из первого уравнения подставляются во второе уравнение, из второго в третье и так далее. Используемые в работе начальные приближения, выбраны наиболее похожими на гипотезы Кирхгофа, это позволяет получить уравнения изгиба близкими к классическим. Последовательно проинтегрировав неизвестные по x , мы получим решение: систему уравнений, где в левой части имеются основные компоненты НДС.

В рассматриваемом случае слоистой среды напряжение может претерпевать разрывы, вызванные коэффициентами жесткости. Подставив напряжение в уравнение равновесия, проинтегрировав по z , получим непрерывное по данной координате напряжение. Также величина $\varepsilon(z)$ может иметь допустимые разрывы в связи с разрывами коэффициентов жесткости.

Была построена полоса, моделирующая балку из композиционного материала, получено решение для задачи по поиску НДС, для медленно меняющихся неизвестных. Полоса имеет ширину 200 мм и толщину 2 мм, и состоит из нескольких слоев с разными углами укладки. Используемый материал – HexPly/34%/UD268/IMA-12K. Также проведено сравнение метода определения НДС полосы с использованием обобщенного закона Гука и метода Сен-Венана-

Пикара-Банаха. Сравнение основывается на численном эксперименте в среде MAPLE. Полученные численные результаты по обоим методам оказались практически идентичны.

Литература

1. Ляв А. Математическая теория упругости / А. Ляв; под. ред. Н.И. Февралев; пер. с англ. Б.В. Булгаков, В.Я. Натанзон. – М.-Ленинград: ОНТИ, 1935. – 672 с.
2. Зверьяев Е.М. Сведение трехмерных уравнений НДС пластины из композиционного материала к двумерным на базе принципа сжатых отображений / Е.М. Зверьяев, Л.В. Олехова // Препринт, ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. – 2014. - №95. - 30 с.
3. Томашевский А.С., Мартиросов М.И. Выбор критерия прочности для элементов конструкции из полимерных композиционных материалов гражданского самолета / М.И. Мартиросов, А.С. Томашевский // Сборник тезисов докладов XLIV Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения». – 2018. - Том 1. – С. 81.
4. Мартиросов М.И., Томашевский А.С. Определение механических характеристик композитного пакета, собранного из монослоев (теория и эксперимент) // Материалы XXV Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. – М.: МАИ, - 2019. - Том.1. - С. 147.

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ АКТЫ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ КАК ОСНОВЫ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ В ОБЛАСТИ СВЕРХМНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

Торчик М.В.

Научный руководитель — к.т.н. Никитин А.Д.

МАИ, Москва

mari.torchick@yandex.ru

В современном представлении об усталости материалов принято выделять несколько режимов нагружения: малоцикловая усталость, многоцикловая усталость и сверхмногоцикловая усталость. Кроме различий в типичных базах испытаний, эти режимы могут быть идентифицированы по механизмам зарождения и развития усталостных трещин. В области малоцикловой усталости (МЦУ) характерным является зарождение нескольких поверхностных трещин и их одновременное развитие, в области многоцикловой усталости (МНЦУ) происходит зарождение и развитие одной поверхностной трещины, в то время как в области сверхмногоцикловой усталости (СВМУ), происходит подповерхностное зарождение одной трещины с последующей стадией подповерхностного роста. Эти особенности в развитии усталостной повреждаемости связаны с различными уровнями пластической деформации. Так, для малоцикловой усталости характерна макроскопическая пластичность, хорошо наблюдаемая в эксперименте как раскрытая петля механического гистерезиса. В этом случае всё поперечное сечение образца переходит в состояние пластического течения, а энергия деформирования достаточна, для зарождения и поддержания одновременного роста нескольких трещин. При многоцикловом нагружении происходит накопление усталостной повреждаемости в пределах, так называемых, полос скольжения с образованием экструзий и интрузий. Эти накопленные повреждения материала обуславливают зарождение поверхностных трещин.

Наблюдения за поверхностью образца, нагружаемого в области МНЦУ, позволяют установить, что в зависимости от уровня внешнего нагружения одновременно могут активироваться различное количество систем скольжения, присущие материалам с заданной кристаллической структурой. В области сверхмногоцикловой усталости возможность наблюдать процесс накопления усталостной повреждаемости представляется весьма затруднительным. Тем не менее, на основании анализа результатов испытаний при многоцикловой усталости, можно сделать предположение, что в области сверхмногоцикловой усталости в процессе накопления циклической повреждаемости должно быть задействовано минимальное количество систем скольжения (одна или максимум две). На основании работ А. Шаньявского [1] принимается гипотеза о мультимасштабности процесса накопления усталостной повреждаемости и принятии двух базовых механизмов: скольжение и поворот, в качестве основных механизмов, реализуемых в области сверхмногоцикловой усталости.

В настоящей работе проводится анализ элементарных актов пластической деформации, оценка их энергоемкости и предпринимается попытка установить связь между внешними нагрузками и управляющими параметрами элементарных актов пластической деформации при СВМУ.

Литература

1. Шанявский А. А. Модели зарождения и развития усталостного разрушения под поверхностью металлов // Научный вестник МГТУ ГА №179, 2012. С. 32-44.

АНИЗОТРОПИЯ ПРЕДЕЛА ТЕКУЧЕСТИ МАТЕРИАЛОВ С АКСИАЛЬНОЙ ТЕКСТУРОЙ

Удовенко Ю.П.

Научный руководитель — доцент, к.т.н. Ерисов Я.А.

Самарский университет, Самара

udovenko-1998@mail.ru

Введение. Одной из специфических характеристик, присущей большинству реальных материалов, является анизотропия их свойств, обусловленная кристаллическим строением вещества и последующим его текстурообразованием при больших пластических деформациях. Одноосная деформация, которая имеет место в таких процессах обработки давлением как осадка, волочение, протяжка, прокатка прутков и прессование приводит к образованию аксиальной текстуры. Аксиальная текстура описывается кристаллографическим направлением зерна $\langle hkl \rangle$, совпадающим с направлением длины полуфабриката. При одноосной деформации ГЦК-металлов, как правило, образуется двухкомпонентная текстура, состоящая из кристаллографических ориентировок $\langle 111 \rangle$ и $\langle 100 \rangle$, объёмная доля которых зависит от энергии дефекта упаковки и деформационных условий.

Математическая модель. Для определения анизотропии предела текучести материала с аксиальной текстурой, ось которой совпадает с осью Z , воспользуемся разработанным критерием пластичности, учитывающим в явном виде константы кристаллической решетки и параметры кристаллографической ориентации структуры. Как видно из полученного выражения, для материала с аксиальной текстурой пределы текучести, действующие в поперечном сечении, равны, но отличаются от предела текучести вдоль оси (наибольшего размера). Таким образом, аксиальная текстура приводит к трансверсальной анизотропии механических свойств.

В целом анизотропия предела текучести обусловлена анизотропией монокристалла A' (маркой сплава), кристаллографической текстурой $\Delta 3$ и её рассеиванием ζ (режимами его обработки). При этом в зависимости от параметра A' текстурированного материала его свойства отличаются от свойств изотропных тел даже при одинаковом характере текстуры, а упругоизотропный материал ($A' = 1$ или $\Delta 3 = 1/5$) будет изотропным и в пластической области.

Результаты. Используя зависимость, определим величину анизотропии предела текучести материала с двухкомпонентной аксиальной текстурой $\langle 111 \rangle$ и $\langle 100 \rangle$ как отношения предела текучести вдоль оси анизотропии к пределу текучести в поперечном сечении σ_3/σ_1 . Рассмотрим прутки из меди, для которого компоненты тензора податливости равны: $S'_{1111} = 15.0$ ТПа-1; $S'_{1122} = -6.30$ ТПа-1 и $S'_{2323} = 3.33$ ТПа-1, тогда по формуле имеем $A' = 3.203$. Выполним расчеты для нескольких значений угла рассеяния текстуры ζ (0° , 15° и 30°). Используя зависимости, для указанных идеальных кристаллографических ориентировок рассчитан ориентационный фактор $\Delta 3$ и обобщенный показатель анизотропии η_{12} .

Установлено, что влияние кристаллографических ориентировок $\langle 111 \rangle$ и $\langle 100 \rangle$ на анизотропию предела текучести прямо противоположное. Так в случае текстуры $\langle 111 \rangle$ предел текучести в поперечном сечении меньше предела текучести вдоль оси анизотропии. С увеличением доли ориентировки $\langle 100 \rangle$ предел текучести в поперечном сечении постепенно увеличивается и достигает максимума при полном отсутствии ориентировки $\langle 111 \rangle$, превосходя при этом величину предела текучести вдоль оси анизотропии.

Такое влияние данных ориентировок приводит к тому, что при содержании компонент $\langle 111 \rangle$ и $\langle 100 \rangle$ равном 60% и 40% соответственно пределы текучести в поперечном сечении и вдоль оси анизотропии равны друг другу, то есть получается изотропный материал.

МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГОДИФФУЗИОННЫХ КОЛЕБАНИЙ КОНСОЛЬНО-ЗАКРЕПЛЕННОЙ БАЛКИ БЕРНУЛЛИ-ЭЙЛЕРА

Файкин Г.М.

Научный руководитель — доцент, к.ф.-м.н. Земсков А.В.

МАИ, Москва

egorc16@mail.ru

Исследование взаимодействия механических и диффузионных полей является важным элементом в различных областях науки и техники, из-за того, что более точное описание воздействия нагрузок различной физической природы на элементы и конструкции требует более глубокого понимания сути протекающих при этом процессов. Это, в первую очередь, важно при расчете корпусов авиадвигателей, фюзеляжей самолётов и ракет, для которых динамические изменения, связанные с внутренним переносом вещества под действием механической нагрузки, могут привести к катастрофическим последствиям. Понимание законов, описывающих процесс диффузии, позволяет избежать нежелательных изменений в авиаконструкциях, происходящих под влиянием нестационарных нагрузок различного характера.

Экспериментально доказано и теоретически обосновано, что внедрение диффундирующего вещества в твёрдое тело порождает в нём внутренние напряжения, а неоднородное поле напряжений, вызванное внешними причинами, способно влиять на диффузионную кинетику переноса вещества

В работе рассматривается консольно-закрепленная балка Эйлера-Бернулли, на которую действует сосредоточенная нестационарная нагрузка, приложенная к свободному концу и порождающая напряженно-деформированное состояние с учетом с учетом диффузионных процессов. Для математической постановки задачи используется модель упругой диффузии для многокомпонентных сплошных сред. С помощью вариационного принципа Даламбера получены уравнения упругодиффузионных поперечных колебаний балки Эйлера-Бернулли.

Решение задачи ищется с помощью метода эквивалентных граничных условий, который заключается в том, что вместо исходной задачи рассматривается вспомогательная задача того же вида, но с граничными условиями, допускающими представление решений в виде рядов Фурье. Для этого достаточно поменять способ закрепления концов балки. Далее строятся соотношения, связывающие правые части граничных условий обеих задач. Эти соотношения записываются в виде интегральных уравнений Вольтера 1-го рода. Затем, полученная система уравнений решается численно с помощью квадратурных формул.

Таким образом, разработанный алгоритм позволяет выразить решение задачи с произвольными граничными условиями через известное решение какой-либо задачи того же вида и с той же геометрией области.

На основании полученных результатов, были построены графики перемещений и изменения концентрации.

Литература

1. Земсков А.В., Тарлаковский Д.В., Файкин Г.М. Постановка задачи о нестационарном изгибе консольно-закрепленной балки Эйлера-Бернулли с учетом диффузии // Проблемы безопасности на транспорте: матер. IX Междунар. научн.-практ. конф., Гомель, 28–29 ноябр. 2019 г. / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп.; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель: БелГУТ, 2019. – Ч. 2. – С. 215–217.
2. Файкин Г.М., Земсков А.В., Тарлаковский Д.В. Постановка задачи о Консольном изгибе балки Эйлера-Бернулли с учетом диффузии // Материалы XXV Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Т. 2. – М.: ООО «ТРИП», 2019. – С. 136–139.

ЗАДАЧА О КОНТАКТЕ БЛОКОВ ИЗ ОРГСТЕКЛА С ПРОФИЛИРОВАННЫМ ЗАБОРОМ

Федорова Н.В., Леган М.А.
ИГиЛ СО РАН, Новосибирск
veter-nata@mail.ru

При контакте профилированного блока с гладкой поверхностью другого блока возникают разные зоны сжимающих напряжений. Используется аналитическое решение для определения перемещений поверхности полупространства под действием равномерно распределённой нагрузки на полосу для вычисления профиля поверхности блока, имеющего конкретные размеры. Проведён численный анализ экспериментальной модели. Показано, что предложенный подход оценки ступенчатого распределения контактного давления в полупространстве может быть использован для блоков реальных размеров.

Задача появилась при подготовке эксперимента по моделированию гидроразрыва пласта (ГРП) в лабораторных условиях. Когда ГРП используется в реальных условиях, то трещину желательнее прорастивать только в продуктивных слоях, где находятся залежи нефти, при этом нельзя пересекать трещиной слои с газом и подземными водами, это приведёт к нежелательным последствиям. Следовательно, геометрия трещины должна быть смоделирована корректно для проектирования и оценки таких воздействий на пласт. Поэтому точное моделирование ГРП при наличии градиента напряжений является фундаментальным требованием для проектирования воздействия на пласт. Для оценки точности модели необходимо сравнение результатов расчёта с данными о росте трещины из тщательно контролируемых и непосредственно управляемых лабораторных экспериментов.

Лабораторный метод основывается на создании пошагового изменения напряжений на границе, которая ограничивает плоскость развития трещины, между двумя блоками оргстекла. Для образования нескольких зон контактного давления на границе между прижатыми друг к другу блоками поверхность одного блока имела заданный профиль, полученный на станке с программным управлением. В результате контакта профилированного блока с гладкой поверхностью другого блока возникают разные зоны сжимающих напряжений. Этот метод впервые был использован в [1] для исследования роста области гидроразрыва в продуктивной зоне низких сжимающих напряжений, которая была ограничена двумя симметричными областями с высокими контактными давлениями. В [2] эксперимент проведен для исследования гидроразрыва в продуктивной зоне средних напряжений, с одной стороны ограниченной барьерной зоной высоких сжимающих напряжений, а с другой стороны зоной низких сжимающих напряжений.

Вязкость разрушения на границе контакта равна нулю и в этом случае рост области гидроразрыва определяется течением вязкой жидкости. Утечки жидкости не происходит из-за того, что проницаемость оргстекла отсутствует. Этот экспериментальный метод отличается от условий в пласте, где имеется проницаемость жидкости в поровое пространство. Однако преимуществом рассматриваемой методики является возможность наблюдения области гидроразрыва в процессе эксперимента через прозрачные блоки.

Экспериментальная установка выполнена по следующей схеме. Имеется подвижная жёсткая стальная плита размерами 600x600x150 мм, которая передает усилие от 6-ти домкратов на блоки оргстекла. В стальной плите есть отверстие под трубку для подвода жидкости гидроразрыва. На плиту устанавливается 1-й разделительный блок оргстекла с размерами 580x580x88 мм, который также имеет отверстие под трубку. Материал блока снижает возмущения поля напряжений на нижней поверхности от концентраторов в виде пазов для лент со светодиодами, необходимыми для подсветки области гидроразрыва. Следующим устанавливается профилированный в одном направлении 2-й блок оргстекла, с размерами 580x580x180 мм, причем профилированной поверхностью вверх. На 2-й блок устанавливается 3-й блок оргстекла с размерами 580x580x182 мм, между нижней плоской поверхностью которого и верхней профилированной поверхностью 2-го блока при сжатии создается ступенчатое распределение давления. Сверху на 3-й блок устанавливается 4-й блок оргстекла с размерами 580x580x187, который является промежуточным между 3-м блоком и верхней стальной несущей плитой. При этом в центре стальной плиты имеется отверстие для видеокамеры, поэтому 4-й блок оргстекла предназначен для того, чтобы не

передавать возмущение напряженного состояния от отверстия для видеокамеры на распределение напряжений в блоках в окрестности области гидроразрыва.

Зоны напряжений образуются в результате контактного взаимодействия при сжатии 2-го профилированного блока с 3-м блоком, у которого поверхность контакта плоская. Траектория профиля может быть получена из решения задачи о ступенчатой нагрузке. Между 2-м и 3-м блоками оргстекла при начальном контакте имеется зазор, однако при сжатии блоков обе поверхности будут полностью прижаты друг к другу и между ними возникает контактное давление. Затем между этими блоками нагнетается жидкость, при достижении некоторого давления появляется область гидроразрыва, которая затем распространяется при меньшем давлении. Необходимо определить распределение сжимающих напряжений, возникающих при контакте плоского и профилированного блоков оргстекла, с учётом влияния реальных размеров блоков и особенностей граничных условий в эксперименте.

Рассмотрим случай действия распределённой нагрузки (давления) на полосу предполагаемого профилированного блока, как показано на рисунке 1 (а). Существует аналитическое решение для определения перемещений поверхности полупространства под действием равномерно распределённой нагрузки на полосу [3].

$$U_z(x) = \frac{-(1-\nu^2) \cdot P}{\pi E} \cdot \left[(x+a) \cdot \ln \left[\left(\frac{x+a}{a} \right)^2 \right] - (x-a) \cdot \ln \left[\left(\frac{x-a}{a} \right)^2 \right] \right] + C, \quad (1)$$

где $P = 4$ МПа – давление, действующее на полосу шириной $2a = 100$ мм. Коэффициент Пуассона оргстекла $\nu = 0,4$, а его модуль Юнга $E = 3,3$ ГПа [2].

С помощью уравнения для перемещений поверхности полупространства получаем форму профиля, симметричного относительно вертикальной оси, показанного на рисунке 1 (б).

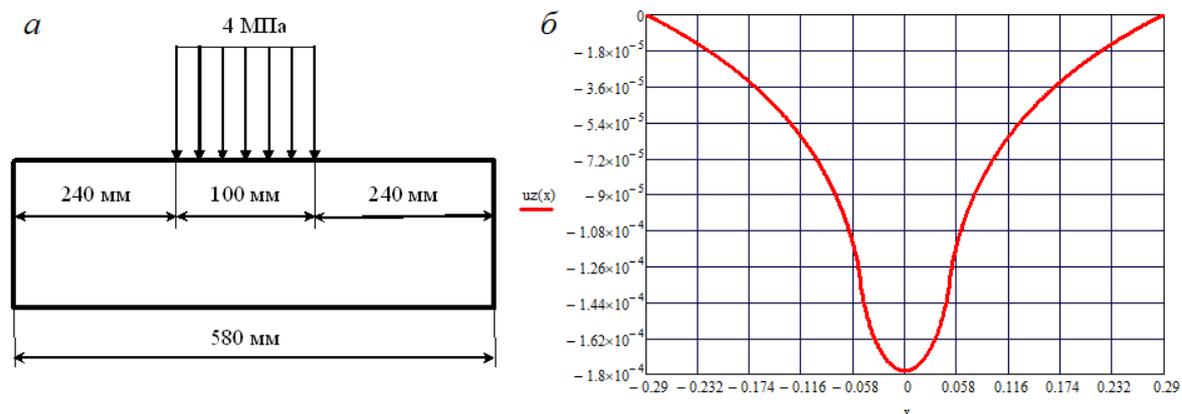


Рис.1. Схема ступенчатой нагрузки (а) и форма профиля, относительно оси симметрии (б).

В эксперименте используется не полупространство, а блоки, имеющие конкретные границы. Кроме того, в аналитическом решении не учитывается отверстие под видеокамеру. Профиль перемещений был вычислен с учётом нагрузки на полосу шириной 100 мм, и был вырезан в блоке в одном направлении. В расчёте задавалась максимальная нагрузка 2500 кН, создаваемая экспериментальной установкой. В расчётной модели эта сила равномерно распределена по всей поверхности верхнего блока из оргстекла, с которой контактирует стальная плита, за исключением круговой области диаметром 0,15 м, расположенной в центре блока и соответствующей отверстию для видеокамеры.

Построена трёхмерная модель сборки блоков из оргстекла. При создании модели профилированного блока, траектория профиля в эскизе задавалась в соответствии с уравнением (1). Закрепление выполнялось по нижней поверхности 1-го блока, по которой оргстекло контактирует с подвижной стальной плитой, при этом перемещения на этой поверхности запрещались по всем направлениям. Контактные пары на границе контакта задавались с учётом трения, при этом в каждом узле выполнялись условия контакта: зазор $g = 0$, сжимающие контактные силы $R_N < 0$, касательные силы $R_T < \mu_s R_N$, где μ_s –

статический коэффициент трения для контактирующих поверхностей оргстекла, который равен 0,8.

Сетка конечных элементов задавалась гексагональной, со сгущением по плоскостям, в зоне контакта профилированного блока, для более точного решения в окрестности зазора (рис. 2). Средний размер конечного элемента составил 0,01м, а в зоне сгущения 0,005 м.

Математическая модель включала в себя: систему уравнений теории упругости (уравнения равновесия, определяющие соотношения, уравнения Коши для малых деформаций); модель контакта с трением. Применялся метод пошагового приращения нагрузки (500 шагов «по времени») Ньютона-Рафсона для решения нелинейных задач с дополнительным алгоритмом линейного поиска; метод множителей Лагранжа для решения контактной задачи. Точки контакта определялись по узлам сетки. Контактная жёсткость обновлялась на каждой равновесной итерации.

В результате численного анализа получили, что при заданной нагрузке контактное давление в центральной части в среднем равно 3,9 МПа, а на краях центральной полосы примерно 5,6 МПа. Распределение контактного давления имеет характерный ступенчатый вид. Давление в центральной полосе меньше давления на боковых полосах в среднем на 4 МПа. Максимальное давление достигает 9,2 МПа. Рассмотренный метод создания ступенчатого распределения контактного давления с помощью профилированного блока может быть использован для блоков реальных размеров при экспериментальном моделировании реального ГРП в слоистых горных породах.

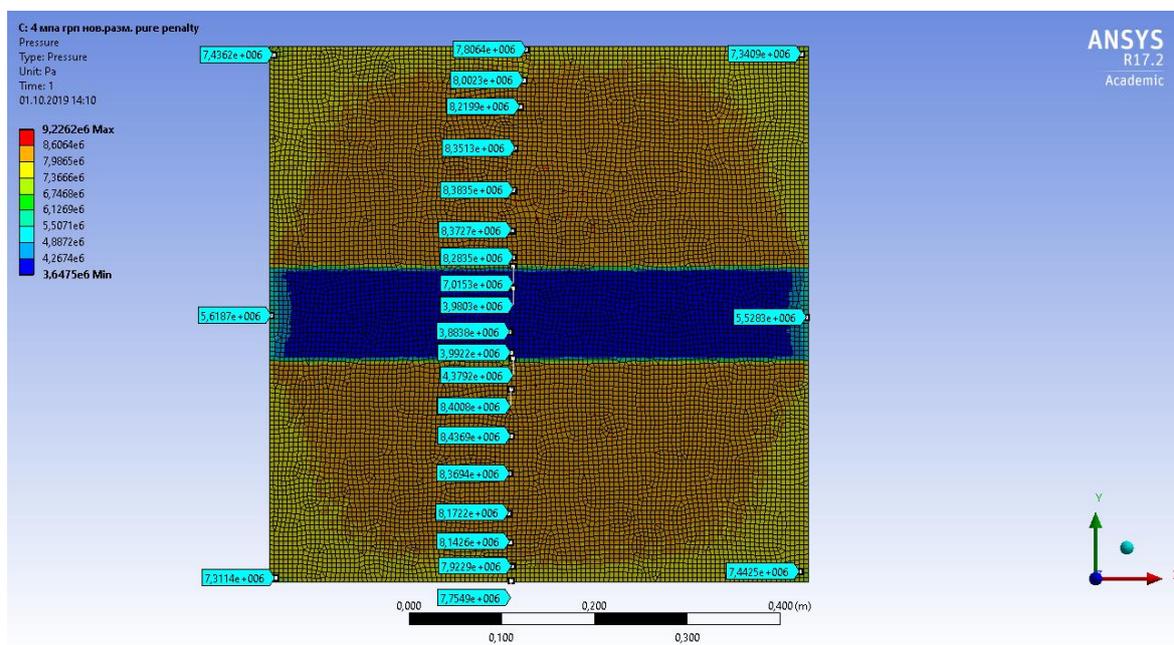


Рис.2. Давления в области контакта профилированного блока.

Литература

1. Jeffrey, R.G., Bungler A.P. A detailed comparison of experimental and numerical data on hydraulic fracture growth through stress contrasts // In: Proc. 2007 SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, College Station, 2007. Paper SPE 106030.
2. Wu, R., Bungler, A. P., Jeffrey R. G., Siebrits, E. A comparison of numerical and experimental results of hydraulic fracture growth into a zone of lower confining stress // In The 42nd US Rock Mechanics Symposium (USRMS). American Rock Mechanics Association. 2008.
3. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 510 с.

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПЛАЗМОТРОНА ВГУ-4 ДЛЯ ЛОКАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО НАГРЕВА

Щелоков С.Л.¹, Колесников А.Ф.²

¹МАИ, Москва

²ИПМех РАН, Москва

schelokov.s.99@gmail.com, koles@ipmnet.ru

Получено соотношение связывающие скорость, энтальпию и давление в дозвуковых струях высокоэнтальпийного воздуха на основе экспериментальных данных для высокочастотной газодинамической установки ВГУ-4. С учетом этого соотношения представлена область моделирования на ВЧ-плазмотроне аэротермодинамических параметров нагрева поверхности затупленных тел для условий входа в атмосферу.

Введение. В лаборатории взаимодействия плазмы и излучения с материалами (ИПМех РАН) проводятся эксперименты по применению потоков низкотемпературной плазмы для локального моделирования аэродинамического нагрева. Для оценки возможностей локального моделирования конвективного теплообмена в критической точке затупленного тела, входящего в атмосферу, необходимы соотношения, связывающие скорость v , энтальпию h и давление p для ВЧ-плазмотрона ВГУ-4.

Постановка задачи. Использовались данные экспериментов в 100-киловаттном ВЧ-плазмотроне ВГУ-4 в дозвуковых струях высокоэнтальпийного воздуха для секционированного разрядного канала с диаметром выходного сечения $D = 30, 40, 50$ и 80 мм при давлении $p = 100$ гПа [1], а также зависимость эффективного радиуса цилиндрической модели с плоским носком r_{eff} от диаметра модели d_m [2] в диапазоне $20 - 140$ мм.

Методы. Для обработки массива данных по энтальпии и скорости дозвукового потока диссоциированного воздуха в зависимости от мощности ВЧ-генератора использовалась электронная таблица. Для оценки линейной корреляции использовался коэффициент Пирсона. Для аппроксимации экспериментальных данных использовался метод наименьших квадратов.

Результаты. Вследствие постоянного массового расхода воздуха должна наблюдаться корреляция между vD^2 для разных диаметров разрядного канала. Тогда для двух разрядных каналов (обозначим их цифрами 0 и 1) можно записать соотношение $v_1 = v_0 D_0^2 / D_1^2$. Коэффициент Пирсона для всех значений vD^2 примерно равен 0.99, что подтверждает предположение. На основе данных экспериментов [1] зависимости характерной скорости v_s от энтальпии на оси струи h_e линейно аппроксимированы и нормированы на значение скорости при энтальпии равной 10 МДж/кг (рис. 1). Данные результаты можно с небольшой погрешностью (средняя ошибка аппроксимации менее 5%) описать единой линейной зависимостью в виде:

$$\frac{v_s}{v_0} = 1 + \alpha_s (h_e - 10) \quad (1)$$

где α_s – некий усредненный коэффициент, v_0 – скорость дозвуковой при диаметре выходного сечения сопла $D_0 = 30$ мм при энтальпии $h_e = 10$ МДж/кг. Тогда скорость v_s можно выразить как:

$$v_s = v_0 \frac{D_0^2}{D_1^2} (1 + \alpha_s (h_e - 10)) \quad (2)$$

Приведем результаты расчета области моделирования теплообмена в критической точке затупленного тела для плазмотрона ВГУ-4, используя полученную зависимость. С учетом условий моделирования теплообмена в критической точке затупленного тела [3] исходная система уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} \left(\frac{8}{3}k\right)^{\frac{1}{2}} \frac{v_{\infty}}{R_n} = \frac{v_s}{R_m^*} \\ v_s = v_0 \frac{p_0}{p_s} \frac{D_0^2}{D_1^2} (1 + \alpha_s(h_e - 10)) \\ h_e = \frac{v_{\infty}^2}{2} \end{cases} \quad (3)$$

Первое уравнение представляет собой равенство градиентов скорости для носка тела и модели, где v_{∞} – скорость набегающего потока на тело, R_n – радиус затупления носка, R_m^* – эффективный радиус модели. Безразмерный коэффициент k показывает отношение плотностей воздуха до и за ударной волной и примерно равен 0.07 [4]. Второе уравнение является следствием постоянного массового расхода газа в разрядном канале при изменении давления с учетом уравнения (2). Третье уравнение показывает зависимость энтальпии в дозвуковой струе от скорости набегающего потока v_{∞} . Из системы (3) выражаем p_s через h_e :

$$p_s = p_0 \frac{v_0}{\sqrt{2h_e}} \frac{R_n}{R_m^*} \frac{D_0^2}{D_1^2} \left(\frac{8}{3}k\right)^{\left(-\frac{1}{2}\right)} (1 + \alpha_s(h_e - 10)) \quad (4)$$

На рис. 2 область моделирования ограничена двумя кривыми p_s для максимального и минимального эффективного радиуса модели при диаметре выходного сечения канала $D_1 = 80$ мм [2]. Здесь же показана траектория аппарата Intermediate Experimental Vehicle (IXV) [5-7]. Для оценки было принято $R_n = 1$ м.

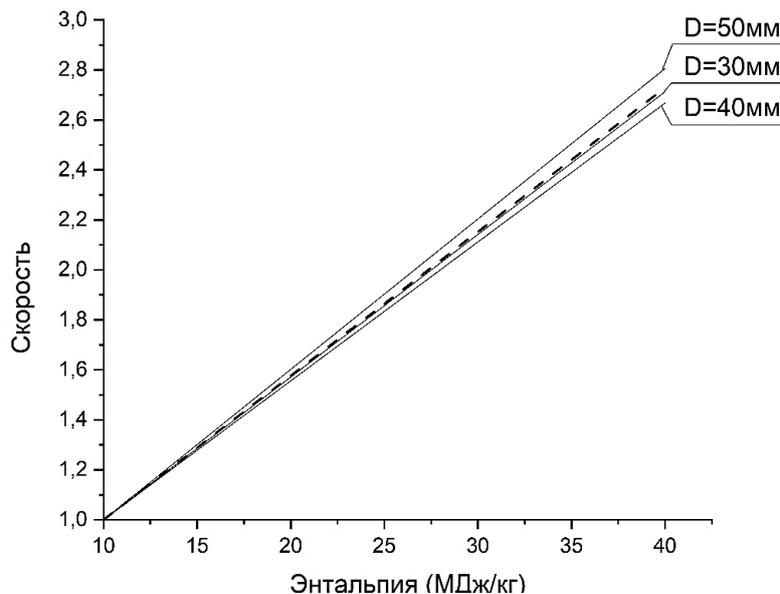


Рис.1. Сплошные линии – нормированные прямые аппроксимации для $D = 50, 40, 30$ мм. Пунктирная линия – зависимость (1).

Заключение. Получена аппроксимация экспериментальных зависимостей скорости дозвуковой струи воздуха в ВЧ-плазматроне ВГУ-4 от диаметра разрядного канала, энтальпии и давления. С помощью полученного соотношения представлена область моделирования конвективного нагрева затупленного тела в критической точке в дозвуковой струе воздуха ВЧ-плазматрона. Для аппарата IXV эта область покрывает небольшой участок траектории. В качестве развития работы можно предложить проверку экстраполяции полученной зависимости (4) при энтальпии ниже 10 МДж/кг.

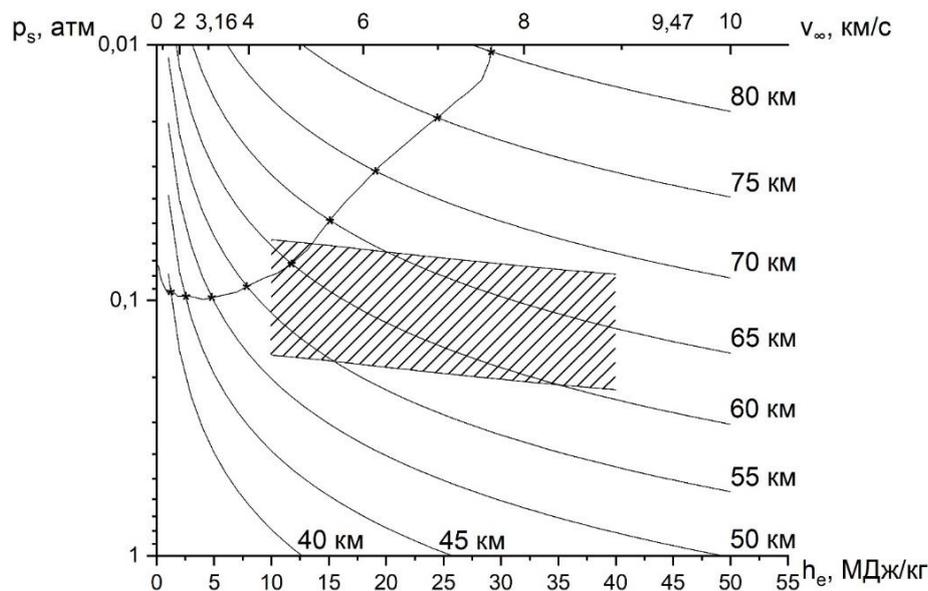


Рис.2. Сплошной линией показана траектория – «IXV», заштрихованная область – область моделирования ВЧ плазмотрона ВГУ-4.

Литература

1. Васильевский С.А., Колесников А.Ф., Гордеев А.Н. Определение энтальпии дозвуковой струи диссоциированного воздуха, обтекающей цилиндрическую модель в индукционном плазмотроне. Препринт №1156. М.: Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН. 2017. 34 с.
2. Васильевский С.А., Колесников А.Ф., Гордеев А.Н., Тихонов А.А. Расчет эффективного радиуса цилиндрической модели, обтекаемой дозвуковой струей воздуха в ВЧ-плазмотроне, и определение энтальпии набегающего потока. Препринт №1115. М.: Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН. 2015. 41 с.
3. Колесников А.Ф. Условия моделирования в дозвуковых течениях теплопередачи от высокоэнтальпийного потока к критической точке затупленного тела // Изв. РАН, Механика жидкости и газа. 1993, № 1, С. 172-180.
4. Лунев В.В. Течение реальных газов с большими скоростями. М.: Физматлит, 2007. 759 с.
5. Щелоков С.Л., Вельмакин Г.С., Возможность моделирования аэродинамического нагрева космических аппаратов на индукционных плазмотронах высокочастотных газодинамических установках // Международная молодежная конференция "XLV Гагаринские чтения", сборник трудов секции Механика и моделирование материалов и технологий. 2019. 198с.
6. A.Viviani, G.Pezzella. Aerodynamic and Aerothermodynamic Analysis of Space Mission Vehicles. Springer Aerospace Technology. 2015. – 898 p.
7. ГОСТ 4401-81. Атмосфера стандартная. Параметры (с Изменением N 1) [Электронный ресурс] // <http://docs.cntd.ru/document/gost-4401-81>

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СРАЩИВАНИЯ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

Щербаков В.В.

Научный руководитель — к.т.н. Петров М.А.

Московский Политех, Москва

tiflant@mail.ru

Разновидности процесса сращивания с использованием энергии трения были известны давно, однако среди них не было способа сращивания, которым можно было бы решать задачу соединения «в стык» тонколистовых конструкций, являющийся основным типом соединения в конструкциях фюзеляжа самолета. И только в 1967 году в СССР впервые был запатентован способ сращивания линейных швов трением вращающимся стальным стержнем, однако в то время способ не нашел дальнейшего развития. Его активное исследование и промышленное освоение началось после того, как в 1993 году Институт сварки Великобритании (TWI) запатентовал аналогичный способ сращивания под названием «Friction Stir Welding» (в переводе на русский язык – сварка трением с перемешиванием) [1]. По своему фундаментальному составу процесс напоминает процессы сращивания материалов, находящихся в тиксотропном состоянии. Тиксотропное состояние

подразумевает одновременное временное существование твёрдой и жидкой фазы. При этом соотношение твёрдая-жидкая фаза влияет на процесс перемешивания и меняется в процессе охлаждения в сторону уменьшения процента жидкой фазы.

Для проведения численного (имитационного) моделирования в программе QForm VX методом конечных элементов была создана численная модель процесса сращивания, которая состоит из 4-ёх последовательных операций:

1. Вертикальное перемещение вращающегося наконечника к заготовке до того момента, пока расстояние между ними не будет составлять 0,01 мм;
2. Нагрев зоны контакта за счёт трения и уменьшение предела текучести твёрдого материала;
3. Внедрение инструмента на половину толщины материала;
4. Перемещение инструмента вдоль стыка.

Проведено исследование алюминиевого сплава АД0 (алюминий технический), с расширенным температурным интервалом (от 20 до 550°C) для ряда степеней деформации и скоростей деформации. Скорость внедрения составляла 1 мм/с, а частота оборотов индентора (шпинделя или штоля) – 1 200 об/мм. Для параметров расчётов, выбранных по умолчанию, моделирование проходит некорректно, т.е. наблюдается несоответствие температуры материала с экспериментальными данными через определённый промежуток времени. Температура достигает максимального значения 37°C, вместо температуры из диапазона 440 – 490°C. Так как в процессе вращения индентора происходит разогрев материала за счёт теплопроводности, то в настройке программы было увеличено значение коэффициента преобразования работы трения в тепло, который входит в уравнение теплового баланса [2]. Благодаря равенству формулы преобразования работы трения в тепло на поверхности контакта заготовки и инструмента и формулы нахождения теплового потока в процессе сращивания можно найти коэффициент преобразования работы трения в тепло $\eta = 35$. Подставляя его в численную модель процесса сращивания температура после первоначального нагрева материала увеличилась с 37°C до 340°C. На втором этапе время вращения индентора составляло 10 секунд, что позволило увеличить температуру до нужного значения из температурного интервала. На третьей операции был осуществлён разогрев материала, инструмент внедрялся в основной объём материала на половину толщины заготовки или на 2,5 мм. На четвёртой операции моделировалось перемещение инструмента вдоль стыка для образования сращиваемого шва. Однако, при перемещении инструмента на 2 мм от первоначального места, сразу стало ясно, что характер течения металла при моделировании процесса сращивания не совпадает с течением материала, наблюдаемом в эксперименте, что можно отнести к особенностям реологической модели, заложенной в программе QForm (применялась модель Хензеля-Шпиттеля). Кроме этого, время расчёта составляло в среднем 24 часа на 1%, при применении процессора Intel i7 (восемь ядер), 8 ГБ DDR3 и дискретной графической карты с 4 ГБ RAM.

Моделирование в ПО Comsol Multiphysics показывает, что при сращивании трением с перемешиванием вращающийся инструмент движется вдоль сращиваемого соединения и генерирует температурное поле, характерное для этого вида процесса. За исходную модель была взята предлагаемая на официальном сайте Comsol численная модель, которая была изменена. Расчётная задача учитывает процессы теплопереноса. Материал заготовки – алюминиевый сплав Д18, в материал индентора – титан. Тепло передается за счет теплопроводности от инструмента (индентера) в пластину и от нагретого материала в окружающую среду (конвективный теплообмен). Поверхности пластины охлаждаются за счет свободной конвекции и излучения от поверхности [3]. Однако, численная модель не была дополнена уравнениями гидравлики (CFD) и моделирование течения материала не было учтено на данном этапе работ.

Литература

1. Кашук Н.М. Разработка технологии изготовления интегральных конструкций авиационной техники с применением метода комбинированной фрикционной сварки. – 2012. – С.13.
2. Руководство пользователя по QForm VX.
3. <https://www.comsol.ru/model/friction-stir-welding-of-an-aluminum-plate-461> (дата обращения: 20.02.2020).

ВНЕДРЕНИЕ ЖЕСТКОГО ЦИЛИНДРА С РАЗЛИЧНОЙ ФОРМОЙ ОСНОВАНИЯ В ВЯЗКОУПРУГОЕ ПОЛУПРОСТРАНСТВО

Яковенко А.А.

Научный руководитель — академик, д.ф.-м.н. Горячева И.Г.

ИПМех РАН, Москва

anastasiya.yakovenko@phystech.edu

В медицине для обработки результатов экспериментов, а также при разработке нового оборудования довольно часто возникает необходимость исследования напряженно-деформированного состояния биологической ткани при ее взаимодействии с инструментом. При этом форма инструмента может быть различной. Так, в стереотаксисе воздействие на органы осуществляется с помощью иглы, которую можно смоделировать длинным цилиндром с закругленным концом [1]. Механические свойства биологических тканей (неоднородность, вязкоупругость) оказывают значительное влияние на исследуемые характеристики. В данной работе считалось, что мягкая ткань является однородным линейно вязкоупругим материалом. Из такого материала, в частности, изготавливают фантомы биологических тканей, на которых тестируют новые методы управления иглой в стереотаксической хирургии [2].

С целью разработки модели взаимодействия инструмента с мягкой тканью в работе исследовано внедрение цилиндрического индентора в вязкоупругое полупространство. Считалось, что внедрение индентора в основание происходило с постоянной скоростью. При этом рассматривалось две формы поверхности основания цилиндра: плоская и сферическая. Во втором случае процесс внедрения состоит условно из двух стадий. В первой стадии, когда угловые точки не вошли в контакт с основанием, радиус области контакта является монотонно возрастающей со временем функцией. При этом давление под поверхностью индентора ограничено и равно нулю на границе области контакта. Во второй, когда радиус области контакта достиг максимальной величины, равной радиусу цилиндра, давление на границе области контакта становится неограниченным.

Используя принцип Вольтерра [3] и упругое решение Галина для заданной формы индентора [4], получены аналитические зависимости контактных характеристик (нагрузки и контактного давления) от времени и глубины внедрения. Полученные выражения позволяют исследовать влияние скорости внедрения и вязкоупругих свойств основания на напряженно-деформированное состояние вязкоупругого полупространства. Также анализировалось влияние радиуса кривизны сферического основания цилиндра на исследуемые зависимости.

Для описания механического поведения вязкоупругих оснований также используются упрощенные стерженьковые модели. Построено решение задачи о внедрении цилиндрического индентора с различной формой торцевой поверхности в вязкоупругое основание, описываемое упрощенной моделью стандартного вязкоупругого тела [5]. Полученные аналитические зависимости позволяют произвести сравнение двух моделей вязкоупругого тела при внедрении в него цилиндрического индентора. Исследованы случаи, когда целесообразнее для описания внедрения индентора в вязкоупругое тело применять упрощенную одномерную модель.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-58-52004 и по теме государственного задания (№ госрегистрации АААА-А20-120011690132-4)

Литература

1. Холявин А.И., Аничков А.Д. Методы наведения в современной стереотаксической нейрохирургии. М.: Российская академия наук, 2017. 170 с.
2. Горячева И.Г., Досаев М.З., Селюцкий Ю.Д., Яковенко А.А., Hsiao C.-H., Huang C.-Yu., Ju M.-S., Yeh C.-H. Об управлении внедрением индентора в вязкоупругую ткань // Мехатроника, автоматизация и управление, 2020.
3. Кристенсен Р.М. Введение в теорию вязкоупругости. М.: Мир, 1974. 341 с.
4. Галин Л.А. Контактные задачи теории упругости и вязкоупругости. М.: Наука, 1980. 304 с.
5. Работнов Ю.Н. Элементы наследственной механики твердых тел. М.: Наука, 1977. 384 с.

ДВУХУРОВНЕВАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛА: УЧЕТ ЭНЕРГИИ ДЕФЕКТА УПАКОВКИ ПРИ ОПИСАНИИ УПРОЧНЕНИЯ

Яковлев А.Ю.

Научный руководитель — доцент, к.ф-м.н. Янц А.Ю.
ПНИПУ, Пермь
ya.anton.96@gmail.com

Работа посвящена модификации двухуровневой математической модели упруговязкопластического деформирования поликристалла, основанной на физической теории пластичности [1, 2] для описания упрочнения материала с явным учетом энергии дефекта упаковки.

Значение ЭДУ необходимо учитывать при моделировании процесса деформирования, поскольку в зависимости от величины ЭДУ качественно изменяется характер и физические причины упрочнения. Известно, что дислокации в материалах с низкой ЭДУ склонны к расщеплению, а переползание для расщепленных дислокаций затруднено. Таким образом, образование барьеров в материалах с низкой ЭДУ приводит к дополнительному упрочнению.

Для учета ЭДУ при описании упрочнения материала в процессе деформирования производится модификация матрицы упрочнения, описывающей взаимодействия дислокаций на различных системах скольжения. Для материалов, обладающих ГЦК решеткой, выделяется 6 независимых компонент матрицы [3], которые описывают взаимодействия дислокаций между собой полями напряжений и взаимодействия дислокаций, приводящие к образованию барьеров.

В работе получены оценки энергии, требующейся для образования барьеров, в зависимости от ЭДУ материала. Рассмотрена система из двух расщепленных дислокаций, движущихся по пересекающимся плоскостям. Оценки энергии сделаны с использованием линейной теории упругости. На основании полученных оценок сделаны выводы о зависимости относительной величины коэффициентов матрицы упрочнения, отвечающих за соответствующие механизмы.

Литература

1. Трусов П.В., Нечаева Е.С., Швейкин А.И. Применение несимметричных мер напряженного и деформированного состояния при построении многоуровневых конститутивных моделей материалов // Физ. мезомех. – 2013. – Т. 16. - №2. – С. 15-31.
2. Трусов П.В., Волегов П.С., Янц А.Ю. Двухуровневые модели поликристаллов: приложение к оценке справедливости постулата изотропии Ильюшина в случае больших градиентов перемещений // Физ. мезомех. – 2015. – Т. 18. - №1. – С. 23-37.
3. Franciosi, P., Zaoui, A., Multislip in fcc crystals a theoretical approach compared with experimental data. // Acta Metall. –1982. –V. 30. –Pp. 1627-1637.

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ ЛАЗЕРНОГО ДИОДА

Яценко Е.А.¹, Соловьев Н.Г.²

¹МАИ, Москва;

²ИПМех РАН, Москва

fedyavaranov.99@mail.ru

Введение. Лазерные диоды – современные электронно-оптические приборы, применяемые во многих сферах науки и техники, в частности, в источниках широкополосного излучения высокой яркости на основе оптических разрядов [1]. Длина волны их излучения зависит от поддерживаемой температуры и, следовательно, может изменяться, что позволяет получать оптический разряд в различных газах. В свою очередь, диапазон изменения температуры, не противоречащий условиям эксплуатации, лежит в промежутке от 15 до 30 градусов Цельсия. Вследствие совокупности этих факторов возникает проблема стабилизации температуры лазерного диода, решение которой представлено в нашем исследовании.

Методы. Было принято решение исследовать данную задачу экспериментально, поскольку она включает в себя множество индивидуальных, трудно учитываемых в общем виде

параметров, например: свойства теплообменника и условия его охлаждения; отвод холодильной мощности лазерным диодом, лишь частично занимающим площадь термоэлектрического модуля и т. д. На основе полученных данных [2] была разработана система термостабилизации, которую для удобства дальнейшего изложения можно разбить на две части:

- термостабилизирующую систему, включающую в себя термоэлектрический модуль, основанный на эффекте Пельтье, [2, 3] и схему обратной связи на базе пропорционально-интегрального регулятора;
- охлаждающую систему, состоящую из теплообменника, вентилятора и схемы автоматического управления скоростью вращения вентилятора в зависимости от температуры теплообменника.

Решение задачи. Разработка схемы термостабилизации проводилась поэтапно на специальном экспериментальном стенде (рис. 1).

Сначала была создана макетная плата, позволявшая вносить изменения в конструкцию. Ее работа анализировалась с помощью сравнения управляющих сигналов при различных компонентах и режимах работы регулятора (пропорциональный, пропорционально-интегральный, пропорционально-интегрально-дифференциальный). В конечном счёте были выбраны наиболее оптимальные параметры. К примеру, по результатам экспериментов мы отказались от дифференциальной составляющей в схеме обратной связи, оценив ее как причину возникновения колебаний в сигнале управления током элемента Пельтье. Далее уже отлаженная схема была воссоздана в виде печатной платы, были проведены заключительные тесты, показавшие способность созданной нами схемы отвечать поставленной задаче термостабилизации лазерного диода. Особенности и преимущества данной схемы обратной связи:

- точность термостабилизации с погрешностью не более 0.1 градуса Цельсия;
- возможность выбора температуры от 15 до 30 градусов Цельсия, соответствующей температурному диапазону эксплуатации лазерного диода;
- время отклика на заданное изменение температуры и мощности лазерного диода – не более 4 секунд;
- переброс температуры при изменении режима – не более 1 градуса Цельсия;
- габаритные размеры (57x48x15 мм);
- сборка из небольшого количества простых аналоговых элементов.

Принципиально схема работает следующим образом: с полупроводникового датчика, расположенного на холодной стороне термоэлектрического модуля, на схему поступают показания о температуре. На одном из операционных усилителей данный сигнал сравнивается с выставленным сигналом, отражающим заданное значение температуры. Полученная разница подается на пропорционально-интегральную часть схемы, генерирующую сигнал обратной связи, противоположный по знаку сигналу отклонения. Данный сигнал поступает на инвертирующий сумматор и, наконец, на транзистор, который управляет работой элемента Пельтье, и температура лазерного диода стабилизируется. Заданную температуру можно изменять в процессе работы системы охлаждения, и в течение нескольких секунд температура плавно достигнет нового заданного значения, что позволяет установить длину волны, излучаемую лазерным диодом.

Следует отметить, что разработанная система превосходит стандартные заводские аналоги по скорости стабилизации, а также по размерам и весу, например, самонастраивающийся пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор ТРМ101 [4], ранее использовавшийся для этих целей.

В свою очередь схема автоматического управления скоростью вращения вентилятора, входящая в охлаждающую систему, была разработана для улучшения характеристик создаваемой нами системы термостабилизации, поскольку она снижает уровень шума, увеличивает срок службы вентилятора и уменьшает расход электроэнергии, что немаловажно при использовании прибора в полевых условиях. Схема способна независимо управлять скоростью вращения трех вентиляторов, которые предусмотрены в системе охлаждения лазерного диода.

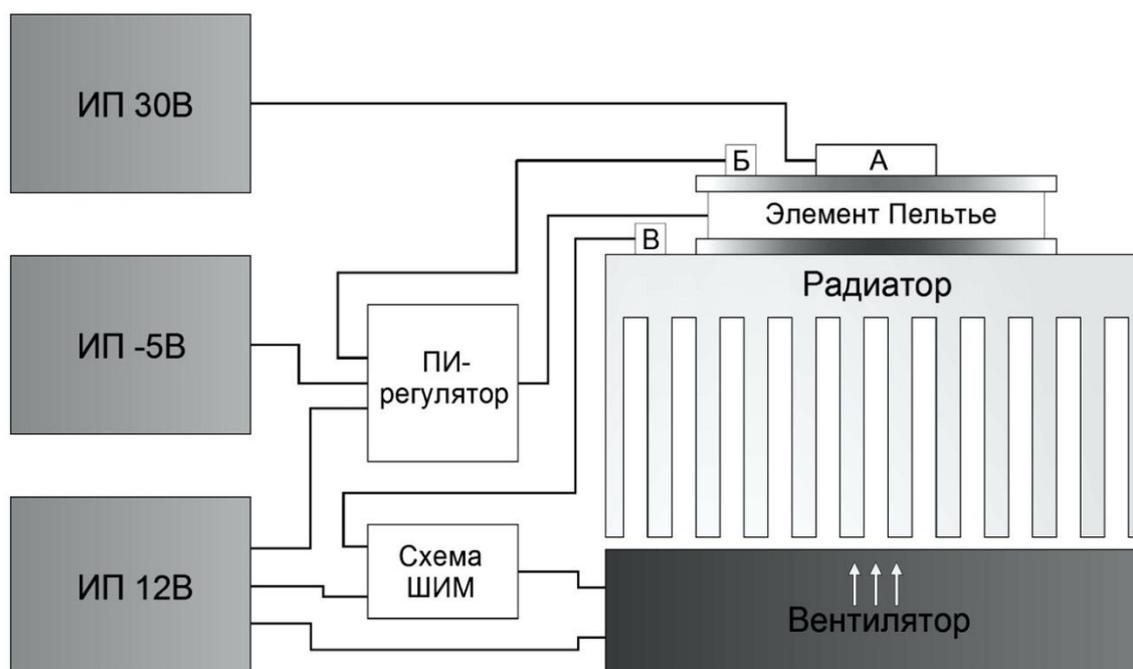


Рис. 1. А – лазерный диод; Б – датчик температуры, расположенный на холодной стороне элемента Пельтье; В – датчик температуры на радиаторе; ИП 30В, ИП -5В, ИП 12В – стабилизированные источники питания +30В, -5В, +12В соответственно.

Схема работает по следующему алгоритму:

- при включении на протяжении нескольких секунд осуществляет продув воздуха через теплообменник на полной мощности вентилятора;
- в остальное время работает в соответствии с поступающими данными о температуре на теплообменнике: при повышении температуры скорость вращения вентилятора увеличивается, при понижении – уменьшается.

Схема выполнена в виде печатной платы и не имеет заводских аналогов, которые бы выполняли указанный выше набор алгоритмов и отличались столь малыми габаритами (50x30x20 мм).

Выводы. Изучены, спроектированы и собраны схема пропорционально-интегрального регулятора, стабилизирующего температуру лазерного диода, и схема автоматического управления скоростью вращения вентилятора. Оба устройства показали положительные результаты при эксплуатации. В дальнейшем планируется интегрирование созданной нами системы термостабилизации в лазерно-плазменный источник широкополосного излучения, прототип которого описан в [1].

Работа выполнена по теме государственного задания № АААА-А20-120011690135-5.

Литература.

1. Зимаков В.П., Кузнецов В.А., Лаврентьев С.Ю., Соловьев Н.Г., Шемякин А.Н., Шилов А.О., Якимов М.Ю. Новые возможности применения оптических разрядов в аэрофизическом эксперименте // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2016. Т.17, вып. 2. <http://chemphys.edu.ru/issues/2016-17-2/articles/653/>
2. Яценко Е. А. Экспериментальное исследование термостабилизации лазерного диода на основе эффекта Пельтье // Сборник трудов секции Механика и моделирование материалов и технологий (ISBN 978-5-91741-244-3). 2019. стр. 191-195.
3. Шостаковский П. Современные решения термоэлектрического охлаждения для радиоэлектронной, медицинской, промышленной и бытовой техники // Силовая электроника. 2010. №1, стр. 130-137.
4. <https://owen.ru/product/trm101>

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ И АКУСТИЧЕСКИЕ ПРИЧИНЫ НАРУШЕНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ШИРОКОПОЛОСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Андросенко В.Н.¹, Якимов М.Ю.²

¹МАИ, ²ИПМех РАН

andros243@yandex.ru

Стабильность плазменных источников излучения определяется стабильностью плазмы разряда. В данной работе на основе наблюдения теневыми методами конвективного факела непрерывного и импульсно-периодического оптических разрядов исследуются гидродинамические и акустические эффекты, вызывающие пульсации оптических разрядов. Показано, что возбуждение акустических колебаний на резонансных частотах в замкнутом разрядном объеме при импульсно-периодической модуляции плазмы оптического разряда вызывает ее пульсации вплоть до погасания.

Введение. Лазерно-плазменные источники широкополосного излучения высокой яркости на основе оптических разрядов (ОР) находят все более широкое применение для исследования физических и химических свойств материалов в поляриметрии, эллипсометрии, микроскопии, абсорбционной спектроскопии и др. Стабильность излучения, важная для применений, определяется стабильностью характеристик плазмы ОР [1, 2].

Основной причиной пульсаций яркости плазмы непрерывного оптического разряда (НОР) являются периодические колебания конвективного факела, образующегося вокруг локального источника тепловыделения. Создаваемая НОР бароклинность среды приводит к тому, что движение газа в окрестности ОР, возникающее из-за термогравитационной конвекции, приобретает вихревой характер. Отрыв вихрей приводит к колебаниям конвективного потока в зоне разряда, вызывающим колебания положения и яркости плазмы. Частота пульсаций растет от 40 до 53 Гц с ростом давления газа от 15 до 45 бар [3].

Дополнительные возможности по увеличению яркости плазмы ОР, особенно в ультрафиолетовом диапазоне, предоставляют импульсно-периодические и комбинированные ОР [4]. Известно, что при импульсно-периодической модуляции электродуговых разрядов развиваются неустойчивости, обусловленные генерацией звуковых колебаний в замкнутом разрядном объеме [5]. Неустойчивости импульсно-периодических оптических разрядов (ИПОР), связанные с генерацией акустических колебаний, практически не изучались. В данной работе на основе наблюдения теневыми методами конвективного факела комбинированного ИПОР исследуются гидродинамические и акустические эффекты, приводящие к неустойчивости ОР вплоть до погасания.

Методы. Комбинированный ИПОР в ксеноне при давлении от 15 до 45 бар поддерживался в экспериментальной установке, показанной на рис. 1, а. На рис. 1, б приведены характерные осциллограммы излучения плазмы ИПОР. Комбинированный ИПОР, способ организации которого аналогичен описанному в [4], инициировался кратковременным электрическим разрядом, после чего плазма поддерживалась за счет поглощения лазерного излучения на пересечении сфокусированных лучей непрерывного и импульсно-периодического диодных лазеров. Частота следования лазерных импульсов могла меняться в пределах от нескольких сотен герц до нескольких десятков килогерц, длительность импульсов – от 10 до 100 мкс.

Наращение излучения плазмы с приходом очередного импульса лазерного излучения (Рис. 1, б) происходит одновременно с увеличением размеров плазмы. Периодическое движение плазменного фронта способно генерировать звуковые волны в разрядном объеме. При определенных частотах повторения импульсов в колбе возникали резонансные звуковые колебания. Звук при резонансе регистрировался пьезокерамическим датчиком, связанным с колбой стеклянным волноводом. Усиленный сигнал пьезокерамического датчика подавался на цифровой осциллограф с функцией измерения частоты.

Появление резонансных колебаний в разрядном объеме вызывало усиленное движение газа, нарушающее регулярность пульсаций конвективного факела ИПОР. По характеру низкочастотных колебаний факела можно было судить о типе возбуждаемых резонансных звуковых колебаний. Изображение конвективного факела получали теневым методом путем просвечивания зоны вокруг ИПОР излучением плазмы ИПОР по схеме, приведенной в работе [3]. Теневое изображение регистрировалось путем видеосъемки на цифровую камеру.

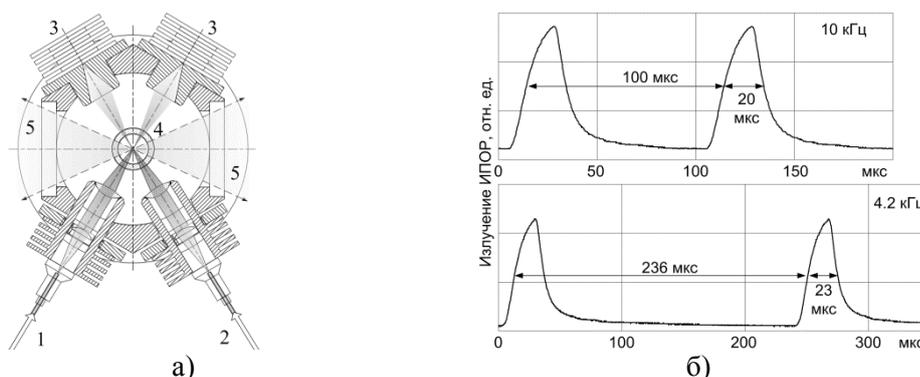


Рис.1. а) Схема комбинированного ИПОР: 1 – непрерывное лазерное излучение 25-30 Вт, 0.97 мкм; 2 – импульсно-периодическое лазерное излучение 55-60 Вт, 0.97 мкм; 3 – поглотители лазерного излучения; 4 – кварцевая колба с ксеноном; 5 – выход излучения ИПОР. б) Осциллограммы излучения комбинированного ИПОР.

Результаты. При плавном изменении частоты повторения импульсов от 1 до 40 кГц и одновременном наблюдении за конвективным факелом было обнаружено множество узких частотных интервалов, при которых происходило нарушение регулярности пульсаций. Одновременно с появлением значительных низкочастотных колебаний конвективного факела, иногда вплоть до погасания плазмы, регистрировались звуковые колебания четырех основных резонансных частот в диапазоне от 7 до 36 кГц. Каждая из резонансных частот соответствовала своему типу нарушения поведения конвективного факела. На рис. 2, а-г показаны основные типы колебаний конвективного факела и указаны диапазоны частот наблюдавшихся при этом резонансных звуковых колебаний. Если предположить, что длины волн резонансных колебаний определяются геометрией разрядного объема, представлявшего собой в первом приближении вытянутый сфероид с полуосями 6.5 и 10 мм, то указанный диапазон частот соответствует изменению скорости звука в ксеноне с увеличением средней температуры газа в разрядном объеме в диапазоне от 300 до 500 °К.

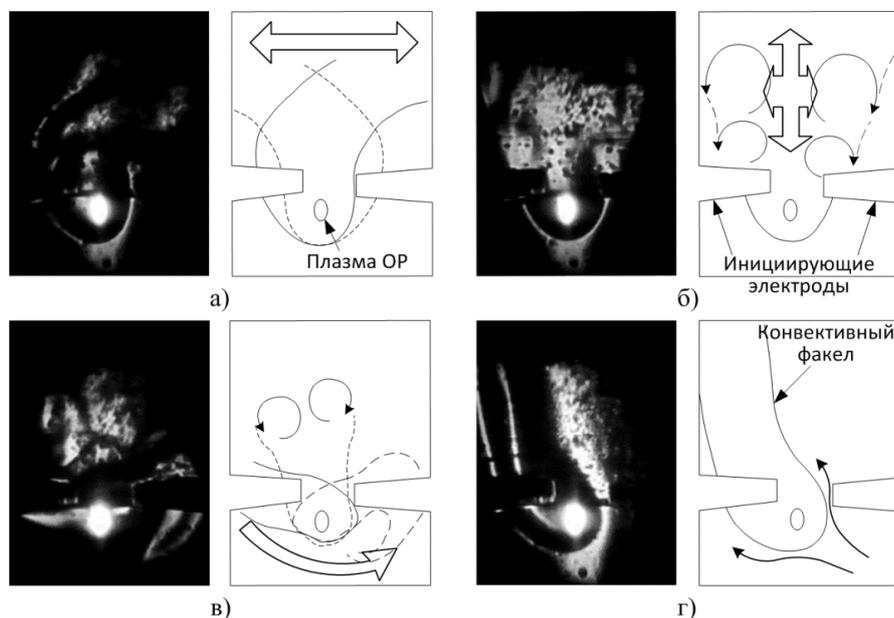


Рис. 2. Типы нарушения поведения конвективного факела комбинированного ИПОР в зависимости от частоты звуковых колебаний: приведен кадр теневой видеосъемки и схема поведения факела. Тонкими стрелками показано движение газа, широкими – колебания факела, линиями показаны границы факела при осцилляциях. а) колебания факела из стороны в сторону, частота звука 22-27 кГц; б) расширение факела при нисходящем движении вихревых колец, 32-36 кГц; в) вращение факела, смешанная частота (12-14)/(24-28) кГц г) стационарный наклон факела, 7-9 кГц.

Волновые числа резонансных акустических колебаний, вычисленные для газа в полости в виде идеального сфероида можно найти в работе [6]. Для указанных параметров расчетные частоты попадают в диапазон частот наблюдаемых резонансных колебаний.

Особо следует отметить, что довольно высокочастотные резонансные колебания начинают возбуждаться при частотах повторения импульсов, составляющих 1/10 соответствующей резонансной частоты или даже ниже (при этом резонансная частота всегда была кратна частоте повторения импульсов, с учетом изменения скорости звука с температурой). На Рис. 3 выше линии частот отложены частоты и диапазоны частот (широкими линиями) в которых наблюдались особенно сильные нерегулярные пульсации комбинированного ИПОР. Снизу стрелками показаны рассчитанные частоты низших основных мод акустических колебаний в эквивалентном сфероиде и их кратные доли.

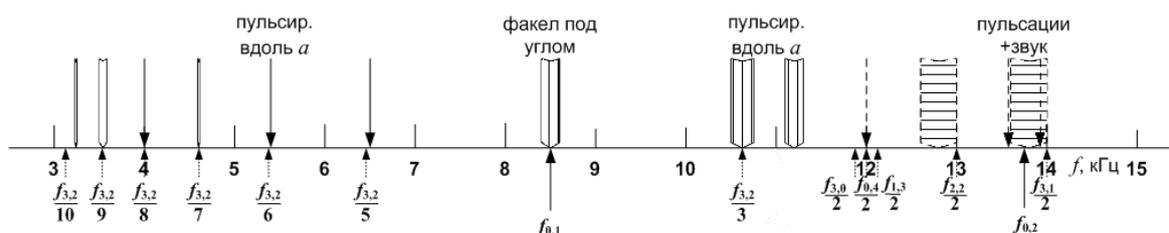


Рис. 3. Выше линии частот (в килогерцах) - частоты и диапазоны частот в которых наблюдались наиболее сильные нерегулярные пульсации комбинированного ИПОР. Снизу – рассчитанные частоты низших основных мод акустических колебаний в вытянутом сфероиде с полуосями 6.5 и 10 мм и их кратные доли.

Видно, что частоты возбуждения особенно сильных резонансных колебаний, приводящих к погасанию плазмы в диапазоне частот повторения импульсов от 3 до 11 кГц совпадают с кратными долями одной резонансной частоты, соответствующей поперечно-радиальным колебаниям, вызывающим неустойчивость типа показанной на рис. 2, б. Неустойчивости на рис. 2, а, в, г соответствуют различным типам резонансных колебаний вдоль большой полуоси эквивалентного эллипсоида. Неустойчивости этого типа вызывают сильные пульсации конвективного факела и излучения самой плазмы, но не приводят, как правило, к погасанию плазмы. При частотах повторения импульсов менее 1 кГц нарушения стабильности плазмы не наблюдались.

Таким образом, в данной работе показано, что при импульсно-периодической модуляции излучения, поддерживающего комбинированный ИПОР, с частотами повторения от 1 до 40 кГц регулярность пульсаций конвективного факела и горения ОР нарушается при частотах повторения импульсов, соответствующих кратным долям резонансных частот разрядного объема как акустического резонатора. Причиной неустойчивости является возбуждение резонансных акустических колебаний в разрядном объеме.

Работа выполнена по теме государственного задания № АААА-А20-120011690135-5.

Литература

1. Зимаков В. П., Кузнецов В. А., Соловьев Н. Г. и др. // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2016. Т. 17(2). <http://chemphys.edu.ru/issues/2016-17-2/articles/653/>
2. Зимаков В. П., Кузнецов В. А., Соловьев Н. Г. и др. // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2018. Т. 19(4). <http://chemphys.edu.ru/issues/2018-19-4/articles/754/>
3. Lavrentyev S. Yu., Solovyov N. G., Shemyakin A. N., Yakimov M. Yu. // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. V. 1394, P. 012012 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1394/1/012012/pdf>
4. Зимаков В. П., Кузнецов В. А., Рудой И. Г., и др. // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2015. Т. 16(2). <http://chemphys.edu.ru/issues/2015-16-2/articles/548/>
5. Gallo C.F., Lama W.L. Acoustical resonances in modulated compact arc lamps // Applied Optics. 1977. V. 16(4). P. 819-820.
6. Chen Pei-Tai. Variational formulation of interior cavity frequencies for spheroidal bodies // J. Acoust. Soc. Am. 1996. V. 100(5). P. 2980-2988.

Абрамов В.Н., 64
 Андросенко В.Н., 5, 125
 Арутюнян А.Р., 6
 Арутюнян Р.А., 6
 Ахмедов Р.И., 6
 Байкова Е.И., 7
 Баимова Ю.А., 92
 Бойко С.В., 8
 Бойков А.А., 11
 Брюханов И.А., 12
 Бульчев Н.А., 56
 Бухалов В.И., 14
 Бучанов В.В., 56
 Бычков П.С., 17
 Вельмакин Г.С., 20
 Вилимок Я.А., 24
 Виндокуров Д.В., 24
 Волегов П.С., 31
 Гаджибеков Т.А., 25
 Гайфутдинов А.М., 6
 Гафуров У.С., 28
 Герасимов Р.М., 29
 Гета О.А., 30
 Гордеев И.С., 53
 Давлятшин Р.П., 31
 Давыдов С.А., 33
 Данилушкин В.С., 34
 Довгаль Д.В., 36
 Дубинец А.О., 37
 Екимовская В.А., 38
 Елеонский С.И., 39
 Жигалова А.И., 42
 Журавлев Н.О., 43
 Загидуллин А., 82
 Загидуллин А.Д., 46, 59
 Зверев Н.А., 49, 51
 Зеленина А.И., 53
 Земсков А.В., 49
 Иванина Е.С., 54
 Идрисов Д.М., 55
 Илюхина А.А., 69
 Каптаков М.О., 56
 Караванова А.Г., 58
 Клявинек С.С., 59
 Колесник С.А., 56
 Колесников А.Ф., 83, 117
 Колесников Д.Н., 59, 71, 80
 Крузман А.Р., 60
 Кувшинникова Д.А., 61
 Кузин А.О., 64
 Куксин Д.Г., 67
 Ларичкин А.Ю., 8
 Ларкин А.С., 67
 Леган М.А., 114
 Ледаев М.Е., 34
 Лисовенко Д.С., 109
 Лихачев А.С., 69
 Лобакова А.О., 69
 Мананникова А.И., 70
 Махмутянов А.Н., 46, 71, 80
 Махова В.С., 73
 Маховская Ю.Ю., 74
 Машкова Д.В., 76
 Мещерякова А.Р., 77
 Миннихметов В.А., 78
 Морозов М.Ю., 79
 Муравьев Э.Н., 56
 Муратаев Т.А., 46, 71, 80, 82
 Мухаммадеев И.М., 46, 59, 82
 Набережнев П.А., 83
 Налетов А.Е., 86
 Овчинников Д.В., 86
 Окатьев Р.С., 87
 Орлова Ю., 88
 Петров М.А., 105
 Подсердцев А.Н., 89
 Полякова П.В., 92
 Попов А.Л., 14
 Прохорчук К.В., 95
 Ревенко В.И., 56
 Рогожева А.М., 74, 98
 Сайтова Р.Р., 6, 98
 Самсонов Н. А., 99
 Сафина Л.Р., 100
 Соловьев Н.Г., 122
 Стратула Б.А., 103
 Сычев А.С., 103
 Тесаков Д.М., 104
 Тимофеев В.В., 105
 Тихомолов А.А., 108
 Ткаченко В.Г., 109
 Томашевский А.С., 110
 Торчик М.В., 111
 Удовенко Ю.П., 112
 Файкин Г.М., 113
 Федорова Н.В., 114
 Щелоков С.Л., 117
 Щербаков В.В., 119
 Якимов М.Ю., 95, 125
 Яковенко А.А., 121
 Яковлев А.Ю., 122
 Яценко Е.А., 122

**МЕЖДУНАРОДНАЯ МОЛОДЁЖНАЯ НАУЧНАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ
«XLVI ГАГАРИНСКИЕ ЧТЕНИЯ»**

СЕКЦИЯ

*Механика и моделирование
материалов и технологий*

СБОРНИК ТРУДОВ

ISBN 978-5-91741-257-3



Подписано к печати 02.11.2020 Заказ № 6-2020 Тираж 30 экз.

Отпечатано на ризографе
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Институт проблем механики им. А.Ю.Ишлинского
Российской академии наук
119526, Москва, пр-кт Вернадского, д.101-1