

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Уральское отделение Российской академии наук
Институт машиноведения УрО РАН
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского УрО РАН

**XIII МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«МЕХАНИКА, РЕСУРС И ДИАГНОСТИКА
МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ»**

Сборник материалов

(Екатеринбург, 09–13 декабря 2019 г.)

Екатеринбург
ИМАШ УрО РАН
2019

УДК 620.17+620.16:620.18+620.19:620.179

ББК 34

Оргкомитет:

Сопредседатели оргкомитета:

Горкунов Э.С. *Екатеринбург, Россия*; Панин В.Е. *Томск, Россия*; Сундер Р. *Бангалор, Индия*.

Члены оргкомитета:

Батаев А.А. *Новосибирск, Россия*

Беляев А.К. *Санкт-Петербург, Россия*

Богданович А.В. *Минск, Беларусь*

Брезинова Ж. *Кошице, Словакия*

Буренин А.А. *Комсомольск-на-Амуре, Россия*

Вухерер Т. *Марибор, Словения*

Головин С.В. *Новосибирск, Россия*

Горячева И.Г. *Москва, Россия*

Гутманас Э. *Хайфа, Израиль*

Дегтярь В.Г. *Миасс, Россия*

Индейцев Д.А. *Санкт-Петербург, Россия*

Иршик Х. *Линц, Австрия*

Ломакин Е.В. *Москва, Россия*

Марущак П.О. *Тернополь, Украина*

Матвеев В.П. *Пермь, Россия*

Мену А. *Касабланка, Марокко*

Миховски М. *София, Болгария*

Морозов Н.Ф. *Санкт-Петербург, Россия*

Муллюков Р.Р. *Уфа, Россия*

Панин С.В. *Томск, Россия*

Прентковскис О. *Вильнюс, Литва*

Смирнов С.В. *Екатеринбург, Россия*

Фомин В.М. *Новосибирск, Россия*

Ченцов А.Г. *Екатеринбург, Россия*

Шиплюк А.Н. *Новосибирск, Россия*

Якушенко Е.И. *Санкт-Петербург, Россия*

Программный комитет:

Председатель: Смирнов С.В. *Екатеринбург*

Члены программного комитета:

Буров С.В. *Екатеринбург*

Гладковский С.В. *Екатеринбург*

Дементьев В.Б. *Ижевск*

Коновалов А.В. *Екатеринбург*

Макаров А.В. *Екатеринбург*

Митюшов Е.А. *Екатеринбург*

Москвичев В.В. *Красноярск*

Наймарк О.Б. *Пермь*

Плехов О.А. *Пермь*

Поволоцкая А.М. *Екатеринбург*

Пугачева Н.Б. *Екатеринбург*

Радченко В.П. *Самара*

Ринкевич А.Б. *Екатеринбург*

Трусов П.В. *Пермь*

Худорожкова Ю.В. *Екатеринбург*

Швейкин В.П. *Екатеринбург*

ХIII Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» Екатеринбург, 09–13 декабря 2019 г. : сб. материалов. – Екатеринбург : ИМАШ УрО РАН, 2019. – 72 с. – ISBN 978-5-6040873-1-2.

В сборнике представлены материалы международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» которая продолжают традиции конференций «Механика микронеоднородных материалов и разрушение» и «Ресурс и диагностика материалов и конструкций», проводимых с 2001 года.

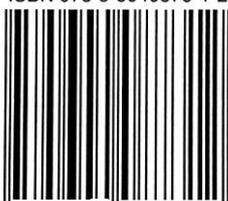
Сборник предназначен для специалистов различных научных специальностей: механиков, физиков, материаловедов и т. д., а также представителей промышленности, что объясняется междисциплинарным характером опубликованных докладов.

Ответственность за содержание и оформление предоставленных материалов несут авторы.

Организатор конференции:

Минобрнауки России, УрО РАН, ИМАШ УрО РАН, ИФПМ СО РАН, ИММ УрО РАН

ISBN 978-5-6040873-1-2



9 785604 087312

© ИМАШ УрО РАН, 2019

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАВНОКАНАЛЬНОГО-УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ ПОРОШКОВОЙ ЗАГОТОВКИ С ПОДПОРОМ ПЛАСТИЧЕСКИ-ДЕФОРМИРУЕМОЙ СРЕДОЙ

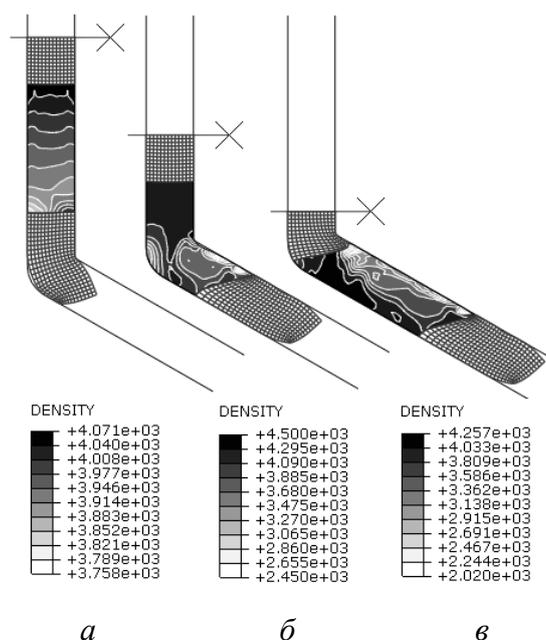
Березин И. М.

*Институт машиноведения УрО РАН (ИМАШ УрО РАН)
д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация
e-mail: berezin@imach.uran.ru*

Интенсивная пластическая деформация некомпактных материалов и, в частности, равноканальное угловое прессование (РКУП) реализуют напряженно-деформированное состояние, характеризуемое совместным объемным сжатием и сдвигом без изменения поперечного сечения образцов [1]. В связи с технологической наследственностью процессов пластической обработки многократное повторение РКУП позволяет накапливать структурные изменения в материале и способствует более эффективному закрытию пустот и несплошностей за счет инициирующего влияния сдвиговой деформации. Однако при обработке порошковых материалов реализация этого процесса без использования противодействия со стороны выходного канала во многих случаях затруднительна [2]. Вызвано это тем, что растягивающие напряжения в передней части деформируемой заготовки могут стать причиной образования поверхностных трещин и разрушения материала. Организация подпора порошковой заготовки на выходе из пресс-формы может быть реализована путем применения специализированного оборудования, позволяющего контролировать усилие противодействия жестким пуансоном. С другой стороны, более простым решением является использование подпора в виде торцевой пробки из пластически деформируемой среды. Исследование эффективности и технологичности процесса РКУП на основе разработки численных моделей и анализа механики изменения плотности порошкообразного материала в процессе пластической обработки является актуальной задачей. Цель работы – моделирование процесса РКУП порошковой заготовки с подпором пластически деформируемой средой для определения картины распределения плотности и выявления технологических факторов способствующих минимизации зон с растягивающими напряжениями.

Моделирование процесса РКУП порошкового материала осуществили на основе метода конечных элементов в программном комплексе Abaqus/Explicit. Материал для прессования – предварительно скомпактированный губчатый титан с относительной плотностью $\rho_{\text{отн}} = 0,6$ ($\rho = 2700 \text{ кг/м}^3$). Пластические свойства порошкового материала определяли на основе методики, описанной в работе [3]. Торцевые пробки представляют собой цилиндрические заготовки диаметром 10 мм. Кривые сопротивления деформации материала торцевых пробок (латунь Л90, бронза БрОФ7-0,2 и сталь 45) взяли из работы [4]. Температура при деформации – 400 °С. Угол между осями пересекающихся каналов пресс-формы варьировали в диапазоне 90...140 град. Диаметр каналов пресс-формы – 10 мм. В рамках данной работы рассматривали процесс однократного прессования. В связи с высокой степенью искажения сетки конечных элементов при сложном нагружении, сопровождающемся изломами траектории деформации, формулировка конечно-элементной модели выполнена на базе ALE-method (Arbitrary Lagrangian-Eulerian adaptive mesh) [5].

На основе анализа результатов численного моделирования выделены три основные стадии процесса прессования. На рисунке представлена картина распределения расчетной плотности в порошковой заготовке в процессе прессования с применением торцевого подпора из латуни Л90 и углом пересечения каналов 120 град.



Распределение плотности в порошковой заготовке на разных стадиях РКУП:
a – подпрессовка заготовки во входном канале; *б* – прохождение заготовки через очаг деформации; *в* – продавливание заготовки в выходном канале

На первой стадии подпор со стороны переднего торца заготовки обеспечивает возможность уплотнения порошкового материала во входном канале пресс-формы. По мере увеличения плотности усилие прессования также возрастает и в определенный момент достигает уровня достаточного для продавливания торцевой пробки. Следующая стадия процесса РКУП характеризуется установившимся течением заготовки. Видно, что после выхода из очага деформации возникает эффект разуплотнения материала. Локализация потенциально опасных зон с малой плотностью наблюдается в слоях порошковой заготовки, прилегающих к верхней стенке выходного канала. При этом уменьшение угла пересечения каналов приводило к существенному углублению зон разуплотнения и возможного разрушения прессовки. Установлено, что повышение величины противодействия за счет применения торцевых пробок из материалов с более высокими значениями сопротивления деформации (например сталь 45) приводит к увеличению плотности и равномерности ее распределения в продольном сечении заготовки. В результате исследований предложены рациональные условия осуществления РКУП порошковых заготовок с противодействием пластически деформируемой средой.

Литература

1. Valiev R. Z., Langdon T. G. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement // Progress in Materials Sciences. – 2006. – Vol. 51, iss. 7. – P. 881–981.
2. Рудской А. И., Золотов А. М., Ганин С. В. Моделирование процесса равноканального углового прессования заготовок из порошковых композиций на основе алюминия и редкоземельных металлов в капсулах // Цветные металлы. – 2014. – No. 4 (856). – С. 30–35.
3. Березин И. М., Белозеров Г. А. Определение параметров модели пластического течения порошкового материала экспериментально-аналитическим методом // XXI Зимняя школа по механике сплошных сред : сборник тезисов докладов. – Пермь, 2019. – С. 43.
4. Полухин П. И., Гун Г. Я., Галкин А. М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов : справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Metallurgy, 1983. – 352 с.
5. ABAQUS 6.10. Theory Manual. – Providence, United States: Dassault Systemes Simulia Corp., 2010.

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУР АЛЮМОТЕРМИТНЫХ ЛИТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИХ ПОЛУЧЕНИЯ

Попов А. В., Комаров О. Н., Жилин С. Г., Предеин В. В.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук
д. 1, ул. Металлургов г. Комсомольск-на-Амуре, 681005, Российская Федерация
e-mail: popov.av@protonmail.ch*

Задача снижения себестоимости металлоизделий при повышении их конструкционной прочности определяет необходимость поиска альтернативных технологических методов. Технологии алюмотермитного получения литых элементов металлоконструкций позволяют вовлечь в производственный цикл окалину, стружку черных и цветных металлов. Процесс получения литых изделий алюмотермией состоит из основных этапов: размещение алюмотермитной шихты в огнеупорном реакторе, расположенном над промежуточным тиглем; запуск экзотермического процесса с образованием расплавов металла и шлака, поступающих в промежуточный тигель; выпуск металла в огнеупорную литейную форму [1]. Алюмотермитные процессы характеризуются высокими температурами реакции, обуславливающие выбор материалов шихты и оснастки, а также необходимость комплексного регулирования параметров технологического воздействия на исходные материалы. Решение этих вопросов относительно узко представлено в современных источниках, что определяет актуальность исследований в этом направлении.

Цель работы – изучение влияния технологических параметров получения литых элементов алюмотермией на управляемое формирование их структур. В рамках отмеченной цели решались задачи, связанные с исследованием влияния исходных шихтовых материалов и времени выдержки расплава в тигле на формирование химического состава и структуры, определяющие итоговые прочностные характеристики литого изделия.

Представлены результаты исследования влияния времени выдержки на массовый выход металла и его химический состав, определяемый компонентами шихты. В качестве восстановителя использован алюминиевый порошок ПА-2. В качестве комплекса оксидов железа применена железная окалина следующего химического состава: С = 0,150 %; Мп = 1,188 %; Si = 2,960 %; S = 0,030 %; P = 0,030 %; Fe = 71,500 %; Al = 0,697 %; Ni = 0,188 %; Cr = 0,173 %; Cu = 0,444 %; O₂ = 22,639 %. Время выдержки варьировалось от 10 до 60 секунд с шагом 10 сек. Вариация соотношения компонентов термитных смесей составила от 19 % к 81 % до 23 % к 77 % с шагом 1 %. Литейная оснастка выполнена из графита ЭГ-15.

В результате серии экспериментов установлено, что содержание углерода при 23 % восстановителя и выход металлической фазы в продуктах реакции при 60 сек. выдержки возрастают. Содержание хрома, марганца и кремния в большей степени зависит от соотношения компонентов термитной шихты, чем от времени выдержки. Содержание меди и никеля сокращается при увеличении в шихте восстановителя. При таких режимах формируется преимущественно мартенситно-ферритная структура, характеризующаяся повышенными прочностными свойствами. Таким образом, установлено влияние регулируемых параметров алюмотермитной реакции на усвоение элементов из исходной термитной шихты. Контроль химического состава позволяет получать литые изделия с прогнозируемой структурой и физико-механическими свойствами, отвечающими назначению конструкций, производимых из этих элементов.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 075-00414-19-00

Литература

The Influence of Structure on the Strength Properties of Casting Steel Obtained with the Use of Thermite Materials / O. N. Komarov, S. G. Zhilin, D. A. Potianikhin, V. V. Predein, E. E. Abashkin, A. A. Sosnin, and A. V. Popov // Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures (MRDMS-2016) : AIP Conference Proceedings. – 2016. – 1785. – P. 040027-1–040027-5.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРЕССОВОК ИЗ ВОСКООБРАЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Соснин А. А., Богданова Н. А., Жилин С. Г., Комаров О. Н.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук
д. 1, ул. Металлургов г. Комсомольск-на-Амуре, 681005, Российская Федерация
e-mail: sosnin@imim.ru*

В промышленности металлоизделия с повышенной точностью и сложной геометрией получают, как правило, механической обработкой припусков литья или массива металла, что требует значительных энергетических и материальных затрат. Среди специальных видов получения отливок литье по выплавляемым моделям в максимально возможной степени решает задачу получения точных изделий. Однако заложенный в технологию принцип формирования выплавляемой модели заливкой жидкой (или запрессовкой пасты) воскообразной модельной массы в пресс-форму не позволяет устранить операции механической обработки конечных изделий ввиду таких тепловых дефектов, как усадка, значение которой в ряде случаев достигает 14 %. Получение выплавляемой модели без усадочных дефектов возможно прессованием порошка модельной массы без предварительного нагрева [1]. Экспериментально установлено, что точность пористых прессованных моделей на 1–2 качества выше, чем у традиционных выплавляемых моделей. Появление жидкой фазы на границе контакта частиц воскообразного материала в ходе уплотнения обеспечивает копирование геометрии формообразующей поверхности пресс-формы. Реализация такого подхода приводит к изменению геометрии выплавляемой модели, возникающему после ее извлечения из пресс-формы за счет упругого последействия материала, что определяет необходимость учета этого явления при проектировании оснастки, поскольку по завершении релаксации материала характеристики конечной прессовки несколько отличаются от расчетных значений. Величина упругого последействия материала выплавляемой модели составляет 0,5–3 % в зависимости от ряда реологических параметров: скорость уплотнения, вязкость и (или) упругость материала [2]. Прогноз напряженно-деформированного состояния прессовок из воскообразных модельных составов посредством математических расчетов с использованием метода конечных элементов представляется актуальным и определяет цель исследования. Для достижения цели решались следующие задачи: определение констант воскообразного материала уплотняемого порошкового тела, необходимых для получения расчетных характеристик напряженно-деформированного состояния прессованных моделей; сравнение графических зависимостей нагрузки (кН) от деформации (%), полученных в ходе математических расчетов и натурных исследований при одноосном вертикальном формировании прессовок из порошкового тела; на основе экспериментальных данных определение возможности использования метода конечных элементов, для составления прогноза напряженно-деформированного состояния прессовок из ряда воскообразных порошковых материалов.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 075-00414-19-00.

Литература

1. Жилин С. Г., Комаров О. Н., Соснин А. А. Моделирование процессов обработки материалов давлением на основе оценки напряженно-деформированного состояния прессовок из полимерных модельных композиций с использованием метода конечных элементов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2017. – Т. 19, № 2. – С. 48–66.
2. Жилин С. Г., Комаров О. Н., Потянихин Д. А., Соснин А. А. Экспериментальное определение параметров регрессионной зависимости Кольрауша для пористых прессовок из воскообразных порошковых композиций // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2018. – № 2 (74). – С. 9.

НЕРАЗРУШАЮЩАЯ ДИАГНОСТИКА АЛМАЗНЫХ ПОКРЫТИЙ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ РЕЗЦОВ

Ашкинази Е. Е.^{1,2}, Хомич А. А.^{1,3}, Попович А. Ф.^{1,3}, Юров В. Ю.^{1,2}, Роголин В. Е.⁴,
Антонова И. А.¹, Ральченко В. Г.^{1,2}, Конов В. И.^{1,2}

¹Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН,
д. 38, ул. Вавилова, г. Москва, 119991, Российская Федерация,
e-mail: jane50@list.ru

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
д. 31, Каширское ш., г. Москва, 115409, Российская Федерация

³Фрязинский филиал ФГБУН Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН,
д. 1, пл. Введенского, Московская область, г. Фрязино, 141190, Российская Федерация

⁴Тверской Государственный университет,

д. 33, ул. Желябова, г. Тверь, 170100, Российская Федерация

Современная техника содержит детали из различных труднообрабатываемых материалов. Для их обработки активно применяются твердосплавные инструменты с алмазными покрытиями (АП), увеличивающие срок службы инструмента и уменьшающие время обработки. Для нанесения АП обычно используется метод химического осаждения из микроволновой плазмы (метод MPCVD), который позволяет получать однородные CVD-алмазные покрытия и высококачественные алмазные пленки. Однако при создании такого инструмента пришлось столкнуться с рядом трудностей, связанных с необходимостью регистрации параметров технологического процесса нанесения АП, проходящего при температуре около 1000 °С. Также необходимо управлять качеством получаемых АП. Оказалось, что для этих целей наиболее пригодны оптические методы неразрушающего контроля.

В процессе работы выяснилось, что наиболее сложным процессом при изготовлении является нанесение АП на острие клина и режущие кромки инструмента, из-за экстремальных эффектов, возникающих на самом острие клина и препятствующих росту алмаза из-за его перегрева вследствие неоднородностей концентрации плазмы и тепловых явлений.

Температуру подложки измеряли в средней части корпуса двухдиапазонным ИК-пирометром («Williamson», модель PRO-81-35-C) и принимали за исходную. Пирометр регистрировал температуру края алмазного покрытия (диаметр пятна составлял приблизительно 2 мм). Решение тепловой задачи нагрева вершины резца в водородной плазме было выполнено методом конечных элементов в программе «AutoCad, 3D».

Большое влияние на качество покрытия оказывает размер зерен АП, зависящий от условий осаждения. Его исследовали с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) алмаза. Известно, что в спектрах КР бездефектного алмаза присутствует только узкий пик на частоте 1332 см^{-1} (полушириной $\leq 3\text{ см}^{-1}$), обусловленный рассеянием света первого порядка на кристаллической решетке. В результате повреждения структуры алмазный пик (1332 см^{-1}) в спектрах КР уменьшался по интенсивности, уширялся и смещался к меньшим частотам.

После проведения процесса морфологию поверхности образца контролировали растровым электронным микроскопом (РЭМ) JSM-6510LV (JEOL).

Таким образом, удалось с помощью оптических методов неразрушающего контроля получить высококачественные АП на твердосплавном инструменте.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССА ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ

Бывальцев С. В.^{1, 2, а)}, Залазинский А. Г.^{1, 2, б)}, Швейкин В. П.^{1, 2, в)}

¹Уральский Федеральный Университет,
д. 19, ул. Мира, Екатеринбург, 620002, Российская Федерация

²Институт машиноведения УрО РАН,
д. 34, ул. Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Российская Федерация
^{а)}s_ikar@mail.ru; ^{б)}zalaz@list.ru; ^{в)}shveikin60@mail.ru

Цель исследования – разработка интеллектуальной системы научных исследований процессов пластического деформирования изделий из труднодеформируемых неоднородных металлических материалов и композитов на примере совершенствования процесса гидромеханического выдавливания.

Применение гидромеханического выдавливания (ГМВ) позволяет реализовать полужидкостный режим трения выдавливаемой заготовки о стенки контейнера и канал матрицы [1], обеспечивая активное действие сил трения за счет опережающего движения слоя смазки относительно заготовки [2]. При этом значительно снижается давление выдавливания и степень неоднородности деформации, уменьшается контакт заготовки с инструментом, что особенно актуально для металлов, налипающих на инструмент [1, 3].

Применен экспериментально-аналитический метод, в соответствии с которым формируется база знаний, содержащая закон движения материальных частиц, физические уравнения и диаграммы пластичности компонентов структурно-неоднородного материала, которые устанавливаются экспериментально. При этом в уравнения включается малое число варьируемых параметров. С учетом действия технологических факторов и используя экстремальные теоремы теории идеальной пластичности, решается вариационная задача, в результате чего конкретизируется деформированное состояние материала. В соответствии с многоуровневым подходом определяется напряженное состояние в макро- и микрообъемах. При определении деформированного состояния экспериментальным путем определяются уравнения линий тока и деформации материальных волокон. С использованием феноменологической теории разрушения осуществляется прогноз поврежденности компонентов структурно-неоднородного материала. Метод развивается для материалов, имеющих в исходном состоянии регулярные структуры.

При построении интеллектуальной системы совершенствования процесса ГМВ исходили из того, что на выходе системы необходимо получать обработанные и обобщенные экспериментальные данные, а также полученные на основе этих данных математические модели исследуемого процесса. Адекватность и точность таких моделей обеспечивается всем комплексом методических, программных и других средств системы.

Система построена на базе серийных средств вычислительной техники и применяет специальную аппаратуру для сопряжения ЭВМ с исследуемыми объектами. Эта аппаратура обеспечивает функции предварительной обработки информации.

Целью создания системы являлось повышение эффективности и качества научных исследований на основе получения и уточнения с помощью системы математических моделей ГМВ, а также применения этих моделей для проектирования, прогнозирования и управления.

Достижение целей создания системы обеспечивается путем систематизации и совершенствования процесса ГМВ на основе применения математических методов и средств вычислительной техники, применения эффективных математических методов организации и планирования экспериментов, использования методов обработки и представления результатов научных исследований и испытаний в виде математических моделей, имеющих заданную форму, а также замены натуральных испытаний и макетирования математическим моделированием.

Основная функция системы состоит в получении результатов научных исследований путем автоматизированной обработки экспериментальных данных и другой информации,

получения и исследования моделей ГМВ на основе применения математических методов, интеллектуальных процедур, планирования и управления экспериментом.

Выводы

Использование входящих в состав системы интеллектуальных процедур позволяет получать и исследовать математические модели ГМВ путем взаимодействия пользователя с системой в режиме диалога, а обработка данных, идентификация или построение математических моделей производятся без участия человека.

В системе применяются процедуры планирования и управления экспериментом, при которых использование моделирования корректирует условия эксперимента, а экспериментальная информация используется для выбора математической модели из некоторого заданного множества таких моделей.

Результатом функционирования является подтверждение (или отклонение) гипотез или совокупность законченных математических моделей, удовлетворяющая заданным требованиям, а также обработанные результаты исследований, наблюдений и измерений.

Функционирование системы обеспечивает получение выходных документов, выполненных в заданной форме и содержащих результаты научных исследований.

Литература

1. Гидропрессование труднодеформируемых тугоплавких материалов и сплавов / Г. Л. Колмогоров, В. Г. Михайлов, Ю. А. Барков, В. Л. Карлинский. – М. : Металлургия, 1991.
2. Mathematical modeling of hydromechanical extrusion // Agapitova O. Yu., Byvaltsev S. V., Zalazinsky A. G. // AIP Conference Proceedings. – 2017. – Vol. 1915. – P. 040001.
3. Agapitova O. Yu., Byvaltsev S. V., Zalazinsky A. G. Analysis of the Stress-Strain State of a Tool during Hydromechanical Extrusion // AIP Conference Proceedings. – 2018. – 2053. – P. 040001.

РАЗРАБОТКА КОРРОЗИОННОЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ НАНОСТРУКТУРНЫМ СПЛАВОМ Fe-Ni, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ РАБОТЫ В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ

Жихарева И. Г., Денисенко Д. В., Шмидт В. В.

Тюменский индустриальный университет,
д. 38, ул. Володарского, г. Тюмень, 625000, Российская Федерация,
e-mail: ardiasardias@gmail.com

В настоящее время в связи с разработкой арктических нефтяных и газовых месторождений возникла потребность в получении новых материалов для защиты оборудования как от морской коррозии, так и от хладноломкости, вызванной низкими температурами. Использование высоколегированных криогенных сталей резко повышает затратную стоимость добываемых нефти и газа, что не обеспечивает требуемой рентабельности.

Новизна. Впервые устойчивая ГПУ фаза железа получена при электролизе из водных растворов солей методом ВПТ, который относится к нестационарным методам электролиза, при нормальных условиях. Получены новые фазы в сплаве. Получены покрытия с заданными фазовым составом и наноструктурой. Определен ряд функциональных свойств, определена скорость фазовых переходов.

Цель работы. Получение наноструктурных покрытий сплавом Fe-Ni с новыми фазами и определение его возможных эксплуатационных свойств.

Анализ результатов. Получено покрытие сплавом Fe-Ni, содержащее наряду с основной объемно-центрированной кубической (ОЦК) α -фазой (феррит) две новые фазы: ГПУ ϵ -Fe и интерметаллид FeNi₃. Авторами [1] методом высокочастотного переменного тока впервые получена устойчивая экзотическая фаза ϵ -Fe для сплавов Fe-Ni при стандартных условиях.

Установлено, что ϵ -фаза формируется только в результате фазового перехода α -Fe \rightarrow ϵ -Fe; ϵ -фаза имеет наноструктурное строение, что согласуется с данными Takahashi, Basset и Bancroft. Фаза эILON железа обладает плотностью 10,24 г/см³, что на 31 % больше, чем у α -Fe.

Основываясь на наших и литературных данных, от полученных нами сплавов на основе железа можно ожидать ряд других ценных эксплуатационных свойств (электропроводных, магнитных и т. д.), что и будет нашим дальнейшим направлением исследований.

Установлено, что исследуемые покрытия сплавом Fe-Ni обладают высокими микротвердостью, коррозионной стойкостью, хладостойкостью за счет получения в них новых фаз (ϵ -Fe и FeNi₃).

Конечным потребителем являются ведущие нефтегазодобывающие компании, которые ведут добычу в районах Крайнего Севера, и Арктики.

Выводы. 1. Методом ВПТ получены наноструктурные покрытия сплавом Fe-Ni, содержащие новые фазы: (ϵ -Fe, ϵ -Fe+FeNi₃).

2. Установлено, что различный фазовый состав определяется химическим содержанием Fe в сплаве: при содержании железа > 80 масс. % образуется 2-х фазное покрытие (α -Fe + ϵ -Fe), а при содержании железа ~68 масс. % – 3 фазы: (α -Fe + ϵ -Fe + FeNi₃).

3. Показано, что обе новые фазы обладают высокой хладостойкостью и коррозионной стойкостью, что позволяет рекомендовать покрытие сплавом Fe-Ni для защиты нефтегазопромышленного оборудования, эксплуатируемого в условиях Арктики

Литература

Iron and Fe–Ni alloy coatings containing ϵ -Fe produced by non-stationary deposition method / I. Zhikhareva, N. Smirnova, V. Schmidt, O. Vorobyev // AIP Conf. Proc. – 2016. – Vol. 1767. – P. 020020-1–020020-4.

PREDICTION OF WEIGHT ABRASIVE WEAR RATE BY MACHINE LEARNING METHODS

Kalentiev E. A.¹, Tarasov V. V.¹, and Lokhanina S. Yu.²

¹*Udmurt Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (UdmFRC UB RAS),
34 T. Baramzinoy St., Izhevsk, 426067, Russian Federation*

²*Udmurt State University (UdSU), 1 Universitetskaya St., Izhevsk, 426034, Russia
e-mail: EugeneKalentev@gmail.com*

Research into tribotechnical and mechanical properties by advanced testing methods is a scientific mission, which needs to be accomplished for creating new materials. Wear resistance of materials is their important performance characteristic. Currently, various machine learning algorithms are widely used in different areas, e.g. speech and handwriting recognition, technical diagnostics, loan scoring, computer vision. An in-process tool wear prediction system, which uses a force sensor to monitor the progression of tool flank wear and ML, more specifically, a Convolutional Neural Network (CNN) as a method to predict tool wear, was presented in [1]. The proposed methodology is experimentally illustrated with the use of milling as a test process. Pin-on-disc experiments are widely used in tribological tests for various friction couples. They enable one to assess the wear rate numerically and to determine the overall picture of profile and debris shaping. However, as noted in [2], the results of these experiments are hard to compare for polyethylene, which causes problems during operation. ML methods for the creation of controlled models allow one to predict the wear of polyethylene in new experiments based on performance parameters.

The paper is concerned with machine learning methods predicting weight abrasive wear rates in a set of wear resistance experiments with model samples made of electrical copper and pure aluminum. To assess the influence of rotation frequency and abrasive grit sizes on the results of wear resistance estimation and the determining values, the samples have been tested with various disc rotation frequencies and various sandpaper grit sizes. It is noteworthy that, during the experiments with materials comparable to copper in hardness and with those harder, the path specified by the test design was completed. However, this test design is not always suitable for the analysis of mechanical characteristics of aluminum since, in some cases, a sample has been fully worn by the end of the test. To analyze the obtained results and develop a machine learning model, a widely used scikit-learn library for the Python programming language is applied [3]. This allows one to overcome possible difficulties during testing. Thus, in the considered variant, one of the tested materials – aluminum – did not complete the whole experiment cycle; therefore, the abrasive wear rate for aluminum could not be determined experimentally. The computational experiments have shown that the Linear Regression with the Polynomial Features method predicts abrasive wear in the most accurate way for the test set.

Based on experimental data, a methodology and prediction models have been adopted, which enable one to take into account the influence of various factors on abrasive wear resistance in order to evaluate the service life of components of machines and mechanisms, such as steel wire ropes in construction, mining, and agricultural machinery used in abrasive-carrying environments.

The work was performed with a financial support from the Russian Foundation for Basic Research (RFBR), grant No. 18-48-180006p_a.

References

1. In-process Tool Wear Prediction System Based on Machine Learning Techniques and Force Analysis / A. Gouarir, Giovanna Martinez-Arellano, German Terrazas, Panorios Benardos, S. Ratchev // *Procedia CIRP*. – 2018. – Vol. 77. – P. 501–504. – DOI: 10.1016/j.procir.2018.08.253.
2. Borjali A., Monson K., Raeymaekers B. Predicting the polyethylene wear rate in pin-on-disc experiments in the context of prosthetic hip implants: Deriving a data-driven model using machine learning methods // *Tribol. Int.* – 2019. – Vol. 133. – P. 101–110. – DOI: 10.1016/j.triboint.2019.01.014
3. Pedregosa F. et al. Scikit-learn: Machine Learning in Python // *J. Mach. Learn. Res.* – 2011. – Vol. 12. – P. 2825–2830.

МАГНИТОУПРУГОЕ РАЗМАГНИЧИВАНИЕ СЛОЖНО НАГРУЖЕННОЙ КОНСТРУКЦИИ

Кулак С. М., Новиков В. Ф., Митрофанов Д. Д.

ФГБОУ «Тюменский индустриальный университет»,
д. 38, ул. Володарского, г. Тюмень, 625000, Российская Федерация
e-mail: ksm-rabochi@rambler.ru

В плане изучения и разработки магнитных методов неразрушающего контроля напряженного состояния, актуальным является исследование магнитоупругих явлений не только на модельных образцах, подвергаемых в лабораторных условиях одноосным деформациям [1], но и на реальных стальных конструкциях, испытывающих при эксплуатации многоосные деформации [1–3].

Цель работы – исследование магнитоупругих явлений в стальной конструкции, испытывающей деформации (в пренебрежении радиальной) вдоль двух взаимно-перпендикулярных направлений.

Задачи исследования:

- выбор объекта исследований и подготовка необходимого оборудования, отработка методики намагничивания объекта;
- исследование зависимости изменения напряженности магнитного поля рассеяния локальной остаточной намагниченности стали от напряжений, создаваемых двухосной деформацией в упругой области;
- изучение поведения коэрцитивной силы стали при двухосной упругой деформации.

Исследования магнитоупругих явлений проводились на газовом баллоне «Пропан» объемом 50 л, состоящем из тонкостенной цилиндрической обечайки (высота баллона 1015 мм, внешний диаметр 299 мм, толщина стенки 3 мм) и выпуклых торцевых стенок, изготовленных из стали Ст3 [4]. Баллон рассчитан на рабочее внутреннее давление газа 1,6 МПа, испытательное давление 2,5 МПа, разрушающее – не менее 5 МПа. Выбор такого объекта исследования обусловлен его простейшим устройством, необходимыми (достаточными) геометрическими размерами и отсутствием внутри дополнительных конструктивных элементов в виде, например, усиливающих перегородок, ограничивающих деформацию наружной оболочки. При заполнении такого сосуда продуктом под давлением его боковая стенка будет испытывать неоднородные деформации растяжения вдоль кольцевой и меридиональной линий [5, 6]. Для определения величины деформаций в работе использовался тензометрический метод.

В ходе проводимых исследований баллон заполняли водой и соединяли с ручным опрессовщиком РР 30, способным создавать давление в нем не более 3,5 МПа. На поверхность боковой стенки баллона в трех равноудаленных друг от друга точках наклеивали по два константановых тензорезистора для измерения ее кольцевой ϵ_k и осевой ϵ_o деформации растяжения. Механические напряжения растяжения σ_k и σ_o в стенке баллона рассчитывались как для тонкостенной оболочки, а эквивалентные $\sigma_{эКВ}$ – по четвертой энергетической теории прочности [5]. В результате тензометрических исследований деформации боковой стенки баллона, вызванной давлением воды до $P = 3,5$ МПа, было установлено с точностью до 2 %, что величины u_k в трех точках на ее поверхности одинаковы и превышают в четыре раза σ_o .

Магнитоупругое размагничивание сложно нагруженной стенки баллона исследовали при двух способах локального намагничивания: вдоль действия кольцевых и осевых деформаций. Для этого использовали два типа Н – образных намагничивающих устройств на основе постоянного магнита $SmCo_5$, отличающихся формой полюсных наконечников, позволяющих создавать остаточную намагниченность в выделенных областях стенки баллона [6–13]. При этом формировалась остаточная намагниченность, ориентированная как вдоль кольцевых, так и вдоль осевых направлений. Измерение в максимуме нормальной и тангенциальной со-

ставляющих вектора напряженности магнитного поля рассеяния остаточной намагниченности проводили феррозондовым магнитометром ИКНМ-2ФП.

Результаты исследования магнитоупругого размагничивания стенки баллона в одной из ее точек представлены на рис. 1, 2.

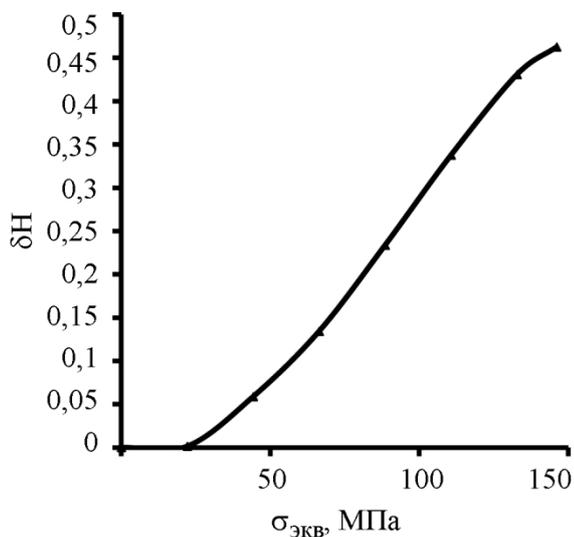


Рис. 1. Зависимость относительного изменения δH напряженности магнитного поля рассеяния локальной остаточной намагниченности стенки баллона вдоль его оси от эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{ЭКВ}}$, создаваемых действием внутреннего давления

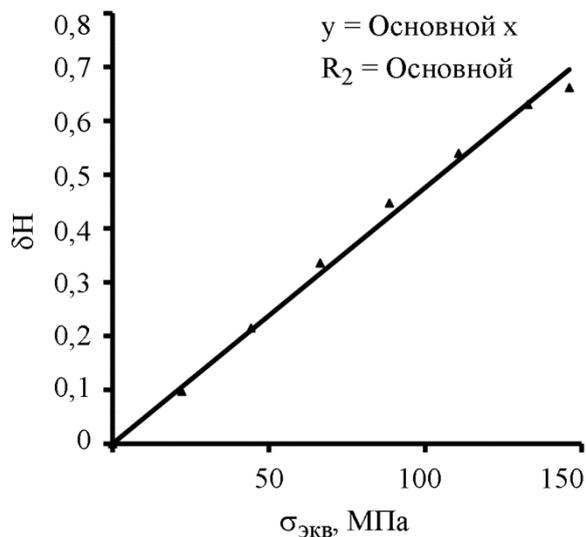


Рис. 2. Зависимость относительного изменения δH напряженности магнитного поля рассеяния локальной остаточной намагниченности стенки баллона поперек его оси от эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{ЭКВ}}$, создаваемых внутренним давлением

Наибольший эффект магнитоупругого размагничивания сложно нагруженной стенки баллона получен при ее намагничивании вдоль действия кольцевых напряжений, создаваемых соответствующей деформацией (рис. 2).

Результаты измерения коэрцитивной силы в той же точке представлены на рис. 3.

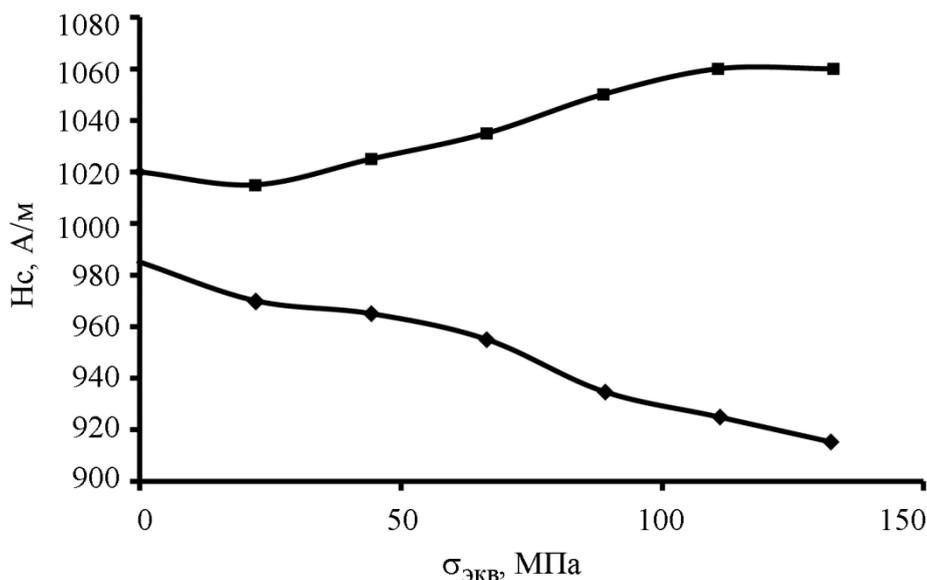


Рис. 3. Зависимость коэрцитивной силы, измеренной вдоль действия кольцевых (\blacklozenge) и осевых (\blacksquare) напряжений в одной из точек боковой стенки баллон, от величины $\sigma_{\text{ЭКВ}}$

Выводы:

- при намагничивании сложно нагруженной внутренним давлением стенки цилиндрического баллона вдоль действия кольцевых напряжений магнитоупругая чувствительность ее стали на 30 % выше, чем при осевом направлении намагничивания;
- магнитоупругая чувствительность изменения остаточной намагниченности сложно нагруженной в упругой области стали заметно выше чувствительности ее коэрцитивной силы;
- получены распределения уровней магнитоупругого размагничивания, коэрцитивной силы, эквивалентных напряжений вдоль двух кольцевых и двух меридиональных линий газового баллона;
- установлено количественное преимущество контроля напряженного состояния сложно нагруженной внутренним давлением стенки баллона методом магнитоупругого размагничивания по сравнению с коэрцитивным.

Литература

1. Новиков В. Ф., Яценко Т. А., Бахарев М. С. Зависимость коэрцитивной силы малоуглеродистых сталей от одноосных напряжений // Дефектоскопия. – 2002. – № 11. – С. 51–57.
2. Захаров В. А., Ульянов А. И., Горкунов Э. С. Закономерности изменения коэрцитивной силы при двухосном асимметричном деформировании // Дефектоскопия. – 2010. – № 3. – С. 55–69.
3. Влияние двухосной упругой деформации на коэрцитивную силу и локальную остаточную намагниченность конструкционных сталей / В. Ф. Новиков, В. А. Захаров, А. И. Ульянов, С. В. Сорокина, М. Е. Кудряшов // Дефектоскопия. – 2010. – № 7. – С. 59–68.
4. ГОСТ 15860-84. Баллоны стальные сварные для сжиженных углеводородных газов на давление до 1,6МПа. – Введ.1985-07-01. – Москва : ИПК Издательство стандартов.
5. Бородавкин П. П., Синюков А. М. Прочность магистральных трубопроводов. – М. : Недра, 1984. – 248 с.
6. Мужичкий В. Ф., Попов Б. Е., Безлюдько Г. Я. Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса стальных металлоконструкций подъемных сооружений и сосудов, работающих под давлением // Дефектоскопия. – 2001. – № 1. – С. 38–46.
7. Захаров В. А., Ульянов А. И., Горкунов Э. С. Коэрцитивная сила ферромагнитных сталей при двухосном симметричном растяжения материала // Дефектоскопия. – 2011. – № 6. – С. 3–15.
8. Новиков В. Ф., Прилуцкий В. В. Свойства остаточной намагниченности в виде полосы и возможности ее использования для неразрушающего контроля // Дефектоскопия. – 2014. – № 7. – С. 24–30.
9. Магнитный контроль напряженного состояния стенки газового сепаратора при его гидроиспытаниях / С. М. Кулак, В. Ф. Новиков, В. В. Проботюк, С. М. Ваценков, Е. С. Фурсов // Дефектоскопия. – 2019. – № 3. – С. 38–45.
10. Горкунов Э. С. Различные состояния остаточной намагниченности и их устойчивость к внешним воздействиям. К вопросу о “методе магнитной памяти” // Дефектоскопия. – 2014. – № 11. – С. 3–21.
11. Необратимые изменения намагниченности как индикаторы напряженно - деформированного состояния ферромагнитных объектов / В. Н. Костин, Т. П. Царькова, А. П. Ничипурок, В. Е. Лоскутов, В. В. Лопатин, К. В. Костин // Дефектоскопия. – 2009. – № 11. – С. 5.
12. Матюк В. Ф., Кулагин В. Н. Контроль структуры, механических свойств и напряженного состояния ферромагнитных изделий методом коэрцитиметрии // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2010. – № 3. – С. 1–14.
13. On controlling stresses in a complexly loaded steel construction by magnetoelastic demagnetization / V. F. Novikov, V. P. Ustinov, A. V. Radchenko, K. R. Muratov, S. M. Kulak, S. V. Sorokina // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2016. – Vol. 52, iss. 6. – P. 357–361. – DOI: 10.1134/S1061830916060073.

МЕТОД ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Курилин С. П., Денисов А. Н., Дли М. И., Бобков В. И.

Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
д. 1, Энергетический проезд, г. Смоленск, 214013, Российская Федерация
e-mail: yovabobkoff@mail.ru

Значение эксплуатационной диагностики для поддержания рабочего состояния парка электрооборудования весьма высоко. Это связано с укрупнением технических систем, с высокой степенью их интегрированности и с повышением их роли в экономической жизни. В полной мере это относится к асинхронным электродвигателям (АЭД), которые являются силовым элементом технических систем и в значительной мере определяют их надежность и живучесть.

В статье авторы представляют топологический метод диагностики, предназначенный для периодического и детального анализа текущего технического состояния АЭД. Топологический метод основан на тестировании отдельных областей векторного пространства электрической машины и сопоставлении результатов тестирования с эталонными данными. В ходе эксплуатации под действием эксплуатационного старения и возможных эксплуатационных повреждений изменяются свойства параметрических матриц обмоток электрической машины и, как результат, свойства ее векторного пространства.

Научные и методологические основы топологической диагностики АЭД представлены авторами в [1, 2]. В качестве источника информации о состоянии АЭД используется векторное пространство, соответствующее параметрической матрице АЭД. Топологический метод диагностики, в отличие от существующих методов, оперирует значительно более детализированной информацией о свойствах объекта. Применительно к АЭД основным показателем отсутствия внутренних повреждений, вызванных некачественным изготовлением и нарушением правил эксплуатации и эксплуатационным старением, является параметрическая однородность рабочей области векторного пространства.

При нормальной работе неповрежденного АЭД векторы электромагнитных величин располагаются в части векторного пространства, называемой рабочей. Приводятся результаты исследования векторных пространств симметричной трехфазной двухполюсной обмотки статора и однородной 12-фазной короткозамкнутой клетки ротора АЭД. Они свидетельствуют о том, что у обмотки и клетки ротора имеется общее подпространство – плоскость $\alpha\beta$. Это подпространство является рабочей областью векторного пространства АЭД.

При проведении эксплуатационной диагностики основной задачей является тестирование рабочей области векторного пространства. Характеристикой текущего технического состояния АЭД служит функциональная матрица Грина [1, 2], столбцами которой являются импульсные вектор-функции Грина. Каждая из них представляет реакцию трех фаз обмотки статора АЭД на воздействие вектора фазного напряжения по одной из осей x, y, z плоскости $\alpha\beta$. Матрица Грина, сформированная по результатам тестирования под номером k и соотнесенная со временем тестирования t_k , отсчитываемым с момента начала эксплуатации $t_0 = 0$:

$$G(t, t_k) = \begin{pmatrix} g_{xx}(t, t_k) & g_{xy}(t, t_k) & g_{xz}(t, t_k) \\ g_{yx}(t, t_k) & g_{yy}(t, t_k) & g_{yz}(t, t_k) \\ g_{zx}(t, t_k) & g_{zy}(t, t_k) & g_{zz}(t, t_k) \end{pmatrix}.$$

Для оценки текущего технического состояния матрица Грина сравнивается с эталонной матрицей $G(t, t_0)$, элементы которой формируются по результатам выходных испытаний на заводе-изготовителе. По результатам последовательных тестирований в моменты времени t_0, t_1, \dots, t_k формируются матрицы отклонений

$$\Delta G(t, t_k) = abc (G(t, t_k) \square (t, t_0)),$$

которые хранятся в технической документации изделия в течение всего срока эксплуатации АЭД. Полученная в результате информация позволяет оценить степень эксплуатационного старения, выявить повреждения и оценить риск потери работоспособности АЭД.

Литература

1. Scientific basis of methods for topological diagnostics of asynchronous electric machines / S. P. Kurilin, V. N. Denisov, A. S. Fedulov, M. I. Dli // AIP Conference Proceedings. – 2018. – 2053. – 030031. – DOI: 10.1063/1.5084392.
2. Kurilin S. P., Denisov V. N. The Development of Topological Diagnostic Methods of Asynchronous Electric Machines // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2018. – Iss. 6. – P. 214–221. –DOI: 10.17804/2410-9908.2018.6.214-221. – URL: http://dream-journal.org/issues/2018-6/2018-6_185.html (accessed: 26.01.2019).

ВЛИЯНИЕ ЖЕСТКОСТИ СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ НА ОЦЕНКУ СИЛЫ ИХ НАТЯЖЕНИЯ ПО ЧАСТОТЕ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ

Муратов К. Р., Новиков В. Ф., Кулак С. М., Попова С. А.,
Овечкин П. В., Закирьянов Е. А.

Тюменский индустриальный университет,
д. 38, ул. Володарского, г. Тюмень, 625000, Российская Федерация,
e-mail: muratows@mail.ru

В рамках работ по оценке состояния вантового перехода на одной из рек ЯНАО была выполнена оценка степени натяжения стальных канатов по частоте их собственных колебаний. На рис. 1 представлен береговой участок вантового перехода, где визуально наблюдается провисание одного из канатов.

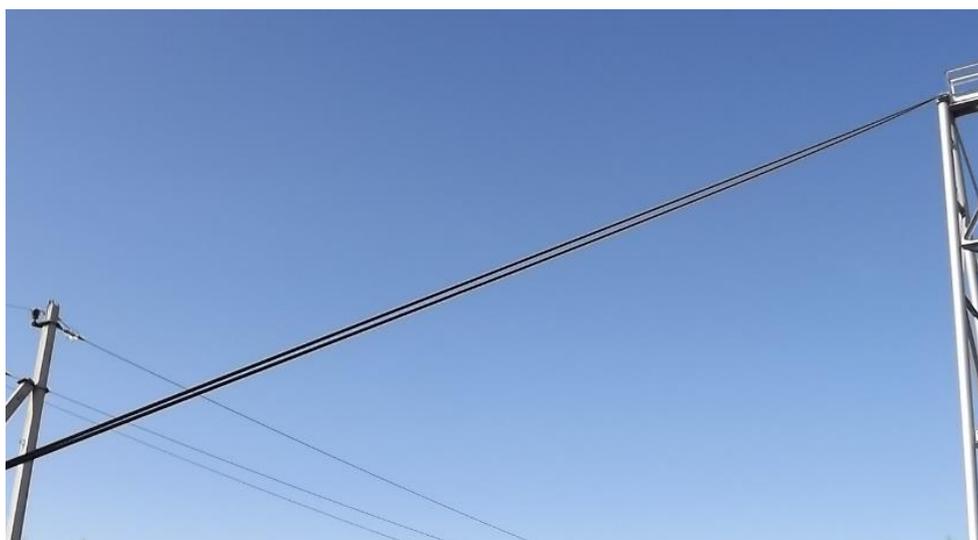


Рис. 1. Стальной канат вантового перехода

Возбуждение поперечных колебаний выполняли деревянной киянкой, регистрацию спектра колебаний выполняли виброанализатором СД-21. Датчик виброанализатора устанавливался в плоскости возбуждаемых колебаний. Для определения силы натяжения F каната использована зависимость [1]:

$$F = 4L^2 \cdot \nu_1^2 \cdot \tau, \quad (1)$$

где L – длина каната; ν_1 – основная частота спектра его собственных колебаний; τ – масса единицы длины каната.

В результате проведенных обследований получены результаты, согласующиеся с проектной документацией. Однако в силу того, что физическим основанием зависимости (1) является модель нерастяжимой нити, которая не проявляет изгибных сопротивлений возник вопрос о степени корректности получаемых данных.

На модели стального каната диаметром 8 мм, длиной 0,91 м с помощью разрывной машины ИР-50 производили его натяжение. Расположенный вблизи каната электромагнит, подключенный к генератору переменного тока ГЗ–117, создавал поперечные колебания. Определение резонанса колебаний выполняли тактильно. На рис. 2 представлена линейная зависимость квадрата частоты основного тона ν_1^2 от силы натяжения. Пунктирной линией изображена аналогичная отнулевая зависимость согласно уравнению (1). Коэффициент достоверности аппроксимации R^2 составил 0,9995. Это значит, что отличие экспериментальной зависимости от теоретической является объективной реальностью. Экстраполяция в область $F = 0$ Н дает значение собственной частоты колебания каната 15 Гц. В случае рассмотрения

каната как объекта, обладающего изгибным сопротивлением, наблюдаемый результат вполне объясним. То есть можно рассматривать канат в качестве стержня.

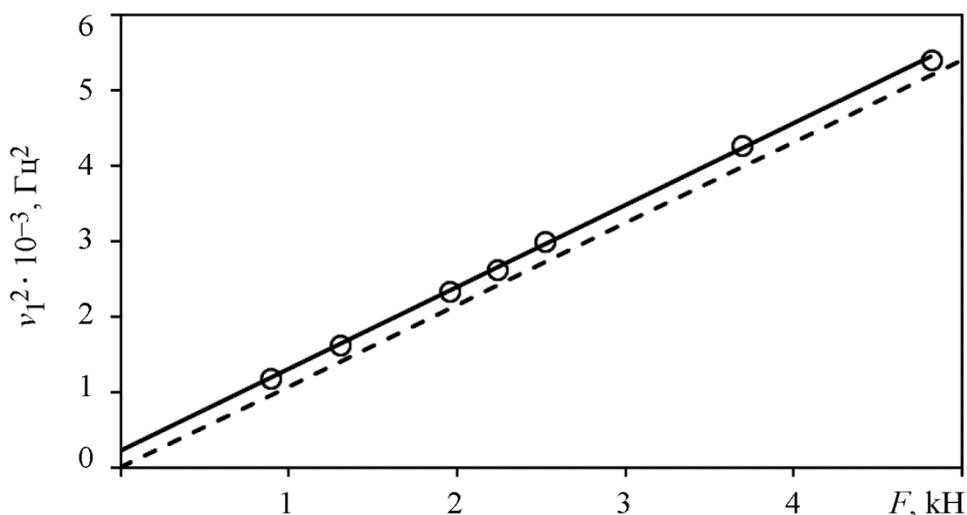


Рис. 2. Зависимость квадрата частоты колебаний основного тона от силы натяжения каната

Рассмотрим дифференциальные уравнения поперечных колебаний нерастяжимой нити и однородного стержня. В первом случае:

$$F \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \tau \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (2)$$

где u – поперечное смещение материальных точек; x – продольная координата; t – время. Во втором случае [2]:

$$-EI \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} = \tau \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (3)$$

где E – модуль упругости; I – момент инерции поперечного сечения; их произведение EI – изгибная жесткость.

Приведенные выражения представляют собой второй закон Ньютона, где в левой части стоит поперечная сила, действующая на малый элемент нити и стержня соответственно. Можно также учесть влияние затухания, при котором в первом линейном приближении добавится поперечная сила, пропорциональная скорости смещения малого элемента: $-r \frac{\partial u}{\partial t}$, где r – коэффициент сопротивления.

Тогда для натянутого каната, обладающего изгибной жесткостью с учетом затухания, дифференциальное уравнение примет вид:

$$F \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - EI \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} - r \frac{\partial u}{\partial t} = \tau \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}. \quad (4)$$

В случае стоячей волны решение дифференциального уравнения 4 для частоты колебаний примет вид:

$$v^2 = \frac{F}{4\tau L^2} n^2 + \left(\frac{\pi^2 EI}{4\tau L^4} n^4 - \frac{\beta^2}{4\pi^2} \right). \quad (5)$$

Здесь n – номер спектра; $\beta = r/2\tau$ – коэффициент затухания.

Таким образом, отклонение экспериментальной зависимости на рис. 2 от отнулевого характера является результатом влияния изгибной жесткости каната и фактора затухания (5). Причем изгибная жесткость обуславливает дисперсию, проявляющуюся в нелинейности частоты v и номера гармоники n .

Для проверки полученного выражения проведены измерения спектра собственных частот колебаний стальной проволоки диаметром 1,57 мм, длиной 0,72 м. Производили нагружение силой 40 и 80 Н. На рис. 3 показана зависимость отношения v^2/n^2 от n^2 . Ее линейный характер говорит о пренебрежимо малом влиянии коэффициента затухания. Угловой коэффициент определяется изгибной жесткостью, свободный член – силой натяжения. Расчетный момент инерции $I = \pi d^4/64 = 0,2982 \text{ мм}^4$, эмпирические 0,2977 и 0,2628 мм^4 при нагрузках 40 и 80 Н соответственно. Расчетные силы натяжения 40,7 и 86,3 Н.

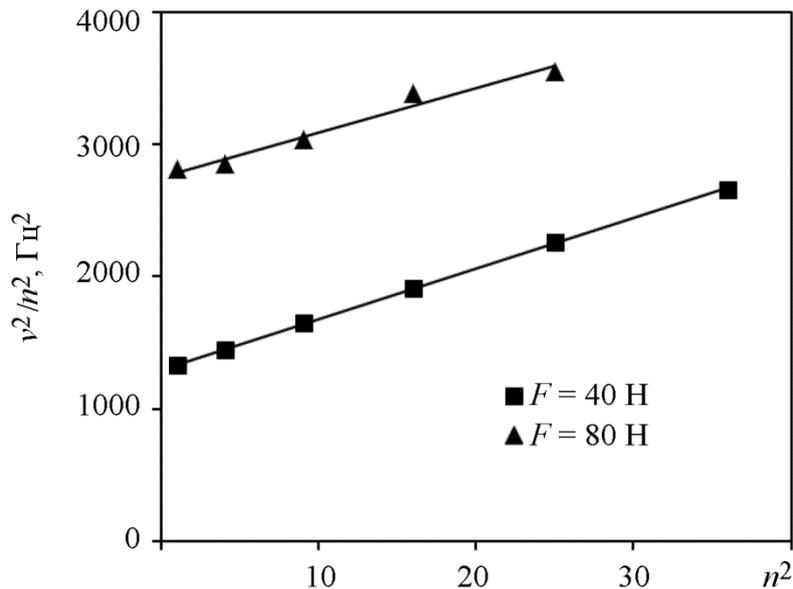


Рис. 3. Зависимость параметра v^2/n^2 от n^2 для стальной проволоки

Результаты исследования позволяют, с одной стороны, оценить систематическую погрешность определения натяжения стальных канатов, с другой – использовать нелинейность частоты резонанса и его номера для мониторинга состояния каната. Повреждение волокон каната приведет к убыли его изгибной жесткости, которую можно выявить измерением спектра резонансных частот.

Литература

1. Способ определения усилия натяжения вантового элемента моста : пат. 2613484 Рос. Федерация. – G01L 110 ; заявл. 17.08.15 ; опубл. 16.03.17, Бюл. № 8.
2. Работнов Ю. Н. Сопротивление материалов. – М. : Физматгиз, 1962. – 456 с.

ВОЗМОЖНОСТИ МАГНИТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ И РЕСУРСА ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ

Новиков В. Ф., Муратов К. Р., Кулак С. М.

ФГБОУ Тюменский индустриальный университет,
д. 38, ул. Володарского, г. Тюмень, 625000 Российская Федерация,
e-mail: vitaly.nowikov2017@yandex.ru

Надежность тензодатчиков обусловлена качеством их приклейки. Они нуждаются в соединительных проводах, которые иногда трудно совместимы с динамичностью конструкции. Актуальным является вопрос о создании датчиков, которые могут обходиться без соединительных проводов, а съем информации можно осуществлять с помощью датчиков магнитного поля [1–3].

Физической основой работы такого рода преобразователей являются необратимое (магнитоупругая «память») или квазиобратимое магнитоупругие явления (пьезомагнитный эффект) [3]. Пьезомагнитный эффект наблюдается у ферромагнитных сплавов после их намагничивания и приложения многократных нагрузок в упругой области [4].

В работе показана возможность создания преобразователей деформации из сталей 30Х13 в виде фольги и К40 в виде проволоки, термообрабатываемых в режимах, обеспечивающих оптимальные механические и магнитные свойства. Все образцы намагничивали постоянным магнитом до насыщения.

Измерение величины магнитного поля рассеяния H осуществлялось феррозондовым магнитометром МЦ-3.003. Образцы нагружались на машине Р50 со скоростью $v = 0,1$ мм/мин в упругой области.

Деформационное размагничивание образца представлено на рис. 1. Используемый материал способен «запомнить» величину пиковых усилий в диапазоне 0–1500 Н.

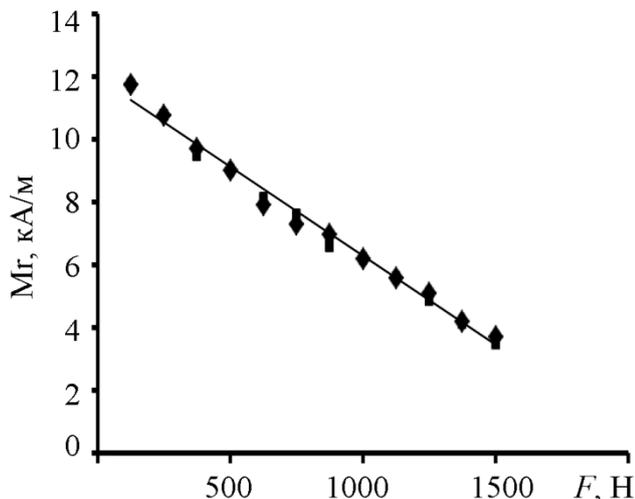


Рис. 1. Изменение намагниченности M_g (кА/м) от растягивающего усилия F , прикладываемого к проволоочному образцу из стали К40: \blacklozenge – первый образец; \blacksquare – второй образец

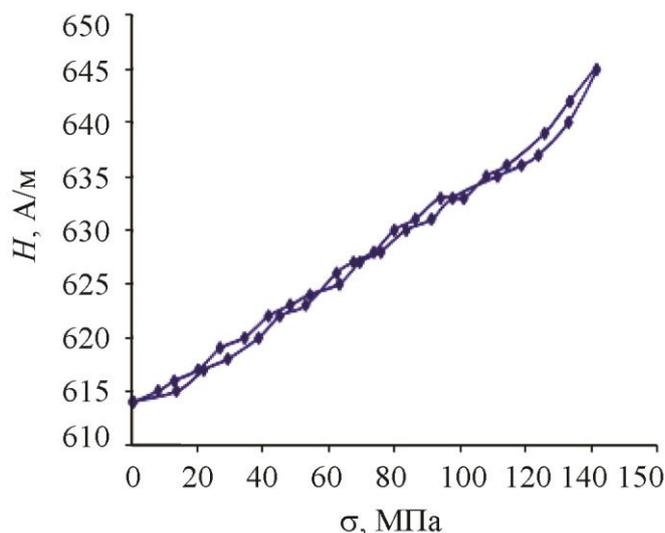


Рис. 2. Зависимость напряженности магнитного поля рассеянности при приложении и снятии механического напряжения и деформационно-тренированного образца из стали 30Х13 (режим пьезомагнитного эффекта)

Квазиобратимое изменение магнитного поля рассеяния намагниченного и подвергнутого многократным упругим деформациям чувствительного элемента при нагружении и снятии нагрузки представлено на рис. 2. Практическое отсутствие гистерезиса говорит об однозначности показаний измерительной системы.

Преобразователи первого типа целесообразно использовать тогда, когда необходимо запомнить максимальную величину деформации. Преобразователи второго типа могут быть использованы для измерения деформации (силы) в режиме *on-line*.

Определение эксплуатационного ресурса, деталей мостов, машин, самолетов возможно с помощью наклеиваемых на немагнитную пластину фольговых датчиков из сплавов железа и никеля, чувствительных к усталости, сказывающейся на изменении сигнала вихретокового прибора [5].



Рис. 3. Зависимость мнимой компоненты Y безразмерного параметра Z сигнала вихретокового прибора в трех точках не отожженной (наклепанной) пермаллоевой фольги толщиной 20 мкм от числа циклов N ее нагружения до разрушения: ■ – точка в центре фольгового элемента; ◆ – точка 2; ▲ – точка 8

Пластинчатый образец с наклеенной на него пермаллоевой фольгой подвергался многоциклового динамическому нагружению на вибростенде. Рис. 3 показывает, что предлагаемый вид преобразователя способен регистрировать предразрушение испытываемого элемента.

Литература

1. Пригоровский Н. И. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений. – М. : Машиностроение, 1983. – 248 с.
2. Ботвина Л. Р. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности. – М. : Наука, 2008. – 334 с.
3. Новиков В. Ф., Бахарев М. С. Магнитная диагностика механических напряжений в ферромагнетиках. – Тюмень : Вектор Бук, 2001. – 220 с.
4. Магнитоупругое размагничивание стали под действием циклического нагружения / К. Р. Муратов, В. Ф. Новиков, Д. Ф. Нерадовский, Р. Х. Казаков // Физика металлов и металловедение. – 2018. – Т. 119, № 1. – С. 19–25.
5. Дроздов Н. А. Электромагнитные преобразователи - свидетели предразрушения конструкции // Новые технологии – нефтегазовому району : материалы Всероссийской с международным участием научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – 2015. – С. 154–157.

ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ХРУПКИМИ ТЕНЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

Пермяков В. Н.¹, Хайруллина Л. Б.²

¹Тюменский индустриальный университет,
д. 38, ул. Володарского г. Тюмень, 625000, Российская Федерация,
e-mail: v.n.permyakov@mail.ru

²Тюменский индустриальный университет,
д. 38, ул. Володарского г. Тюмень, 625000, Российская Федерация,
e-mail: hairullina.1964@mail.ru

В процессе эксплуатации металлические конструкции подвержены нагрузкам и воздействиям коррозионно-активных сред, что приводит к накоплению повреждений, способствующих росту дефектов.

С течением времени происходит старение металла, выражающееся в снижении трещиностойкости, повышении хрупкости. Неконтролируемое развитие дефектов под влиянием эксплуатационных факторов может приводить к отказам и авариям.

Проблема контроля и диагностики материалов и конструкций производственных объектов на сегодняшний день очень актуальна.

Важной составляющей обеспечения промышленной безопасности нефтегазового оборудования в различных условиях эксплуатации является обнаружение опасных дефектов в конструкциях сложной геометрической формы и больших пространственных объемов. Отличительной особенностью данных объектов является функционирование в углеводородной среде, что ограничивает набор экспериментальных методов, позволяющих оценить напряженно-деформированное состояние (НДС) конструкции.

Одним из эффективных направлений решения проблемы является усовершенствование метода хрупких тензочувствительных покрытий (ХТП) путем разработки нового состава хрупкого покрытия.

Рассматриваемый метод неразрушающего контроля ХТП основан на том, что нанесенное лаковое покрытие деформируется совместно с поверхностью, на которую оно нанесено, когда напряжения в покрытии достигают предела прочности материала покрытия, в нем образуются трещины, перпендикулярные направлению наибольшего растягивающего напряжения [1].

Для исследования напряженно-деформированного состояния разработаны несколько типов, хрупких тензочувствительных покрытий, каждое из которых имеет свой диапазон применимости.

Существующие типы хрупких покрытий обладают чувствительностью ε_0 порядка $(2\pm 20) \cdot 10^{-4}$. Первые трещины в покрытии на стальных деталях появляются при напряжении $(20\div 40)$ МПа.

Основной характеристикой метода ХТП является тензочувствительность ε_0 – величина главной деформации растяжения на поверхности образца, детали или конструкции в условиях линейного напряженного состояния, при котором в хрупком покрытии возникает первая трещина [1].

Тензочувствительность покрытия увеличивается с ростом толщины. Чтобы уменьшить разброс чувствительности, необходимо наносить на деталь покрытие равномерной толщины. Эксперименты показывают, что для получения стабильной чувствительности наиболее приемлемая толщина покрытия 0,1–0,13 мм.

Принцип формирования композиции состава хрупкого тензочувствительного покрытия для исследования напряженно-деформированного состояния конструкции предусматривает следующие требования к составу покрытия: прозрачность, высокую чувствительность, хорошую адгезию к конструкционным материалам, заданный предел прочности в интервалах эксплуатационных температур и влажности, устойчивость к условиям производственной среды.

В результате планирования экспериментов и поиска возможных химических компонентов для создания покрытия за основу при разработке нового состава была взята резорциноформальдегидная смола, которая является продуктом поликонденсации резорцина и формальдегида в среде этилового спирта, этиленгликоля и водного раствора. Важным свойством фенолоформальдегидных смол является нерастворимость в углеводородных средах. Роль пластификатора выполняет карбомидно-формальдегидный концентрат, который способствует уменьшению межмолекулярного взаимодействия и повышает кинетическую гибкость цепи, что приводит к уменьшению времени структурной релаксации и сдвигу температуры стеклования. Для получения неплавкого нерастворимого продукта к лакокрасочным материалам добавляется отвердитель. Ускорителем отвердевания для сшивания резорциновых наволаков служит уротропин [2].

Таким образом, усовершенствование метода хрупких тензочувствительных покрытий путем разработки нового состава хрупкого покрытия позволит расширить применение метода для контроля и диагностики материалов и конструкций.

Литература

1. Пригоровский Н. И., Панских В. К. Метод хрупких тензочувствительных покрытий. – М. : Наука, 1978. – 183 с.
2. Хрупкое покрытие на основе искусственных смол : пат. 2313551 Рос. Федерация / Пермяков В. Н., Махутов Н. А., Хайруллина Л. Б., Паршуков Н. Н., ТюмГНГУ. – МПК¹¹ G 01B 11/16 ; заявл. 27.09.2006 ; опубл.27.12.2007, Бюл. № 36.

НЕОДНОРОДНОЕ ТЕЧЕНИЕ ТИПА КУЭТТА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ УСЛОВИЯ ИДЕАЛЬНОГО СКОЛЬЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ НА НИЖНЕЙ ГРАНИЦЕ БЕСКОНЕЧНОГО СЛОЯ

Привалова В. В., Просвиряков Е. Ю.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения
Уральского отделения Российской академии наук,
34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: valentprival@gmail.com; evgen_pros@mail.ru*

Рассматривается трехмерное установившееся изобарическое течение слоя вязкой несжимаемой жидкости. Для описания этого течения используется система уравнений, состоящая из уравнения Навье-Стокса и уравнения несжимаемости. Получено точное решение, являющееся обобщением классического течения Куэтта. Решение представляет собой линейные функции продольных (горизонтальных) координат.

Точное решение приводится к безразмерному виду, что позволяет проводить исследования течения, варьируя безразмерные критерии подобия и параметр геометрической анизотропии слоя жидкости.

В качестве граничных условий для решения краевой задачи трехмерного установившегося изобарического течения слоя вязкой несжимаемой жидкости течения слоя жидкости были рассмотрено условие идеального скольжения на нижней твердой неподвижной поверхности и движение ветра на верхней свободной поверхности.

Показано, что полученный вид решения описывает вертикальную закрутку в жидкости, возникающую из-за учета сил инерции и неоднородного распределения скоростей на свободной границе слоя жидкости. Решение позволяет описывать противотечения несжимаемой жидкости в тонком слое. Записаны условия существования точек внутри слоя жидкости, в которых скорость обращается в нуль.

Показана локализация расслоения в приграничных слоях течения жидкости при различных значениях модифицированного числа Тейлора. Показано, что по физическому смыслу числа Тейлора, при значительном возрастании центробежных сил по сравнению с силами вязкого трения, нулевое значение функции компонент скорости будет локализоваться вблизи верхней границы. Проведенный анализ решений применим для крупномасштабных течений Мирового океана.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 19-19-00571).

Литература

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. 6-е изд. – Москва: Физматлит, 2006. – 736 с.
2. Педлоски, Дж. Геофизическая гидродинамика: в 2 т. – М.: Мир, 1984.
3. Аристов С.Н., Просвиряков Е.Ю. Неоднородные течения Куэтта // Нелинейная динамика. – 2014. – Т. 10, № 2. – С. 177–182.
4. Аристов С.Н., Просвиряков Е.Ю. Волны Стокса в завихренной жидкости // Нелинейная динамика. – 2014. – Т. 10, № 3. – С. 309–318.
5. Аристов С.Н., Просвиряков Е.Ю. Крупномасштабные течения завихренной вязкой несжимаемой жидкости // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2015. – № 4. – С. 50–54.
6. Аристов С.Н., Просвиряков Е.Ю. Нестационарные слоистые течения завихренной жидкости // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. – 2016. – № 2. – С. 25–31.
7. Vinogradova O.I., The Drainage of Thin Liquid Film Confined Between Hydrophobic Surfaces // *Langmuir*. – 1995. – Vol. 11. – P. 2213–2210
8. Коротаев Г.К., Михайлова Э. Н., Шапиро Н. Б. Теория экваториальных противотечений в Мировом океане. – Киев: Наук. думка, 1986. – 208 с.
9. Mehdizadeh A., Oberlack M. Analytical and numerical investigations of laminar and turbulent Poiseuille–Ekman flow at different rotation rates // *Physics of Fluids*. – 2010. – Vol. 22, no.10. – P. 105104.

ТОЧНОЕ РЕШЕНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕЧЕНИЯ СЛОЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ УСЛОВИИ НАГРЕВА НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ

Привалова В. В., Просвирияков Е. Ю.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения
Уральского отделения Российской академии наук,
34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: valentprival@gmail.com; evgen_pros@mail.ru*

В работе предложено новое точное решение трехмерной задачи установившегося слоистого конвективного течения вязкой несжимаемой жидкости. Для описания течения записана система уравнений, включающая в себя уравнения Навье-Стокса в приближении Буссинеска, уравнение теплопроводности и уравнение несжимаемости.

Предложенное решение представляет собой однородные горизонтальные компоненты скорости, зависящие только от вертикальной (поперечной) координаты, а также описывает течение слоя вязкой несжимаемой жидкости с ненулевыми градиентами по горизонтальным (продольным) координатам температуры и давления.

Для полученного общего точного решения была решена краевая задача. Для этого на нижней границе слоя задавались ненулевые градиенты температуры и условие проскальзывания Навье. На верхней свободной поверхности слоя жидкости рассматривались касательные напряжения и температура заданными нулю, а давление с постоянными, ненулевыми поперечными градиентами.

Горизонтальные компоненты скорости полученного точного решения определяются взаимодействием двух потоков: потока, вызванного перепадом давления (пуазейлевского потока); потока, вызванного нагревом/охлаждением и действием силы тяготения (термогравитационного потока). Каждый из этих потоков в отдельности при определенном значении длины проскальзывания может допускать появление застойной точки. Наложение этих потоков существенно усложняет топологию поля скоростей.

Показано, каким образом способ определения контакта жидкости с твердой поверхностью влияют на возникновение в течении слоя жидкости застойных точек. Для полученного частного точного решения показана возможность возникновения областей противотечения и соответствующие им изменения касательных напряжений и вектора завихренности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 19-19-00571).

Литература

1. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. – Москва: Наука, 1972. – 392 с.
2. Бурмашева Н. В., Просвирияков Е. Ю. Крупномасштабная слоистая стационарная конвекция вязкой несжимаемой жидкости под действием касательных напряжений на верхней границе. Исследование поля скоростей // Вестн. Самарск. гос. техн. унив. Сер. физ.-мат. науки. – 2017. – Т. 21, № 1. – С. 180–196.
3. Privalova V.V., Prosviryakov E.Yu. Couette–Hiemenz Exact Solutions for the Steady Creeping Convective Flow of a Viscous Incompressible Fluid, with Allowance Made for Heat Recovery // J. Samara State Tech. Univ., Ser. Phys. Math. Sci. – 2018. – Vol. 22, No. 3. – P. 1–17.
4. Аристов С.Н., Просвирияков Е.Ю. Нестационарные слоистые течения завихренной жидкости // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. – 2016. – № 2. – С. 25–31.
5. Neto C., Evans D., Bonaccorso E. Boundary slip in Newtonian liquids: a review of experimental studies // Reports on Progress in Physics. – 2005. – Vol. 39. – P. 2859–2897.

6. Янков В. И., Боярченко В. И., Перевадчук В. П., Глот И. О., Шакиров Н. В. Переработка волокнообразующих полимеров. Основы реологии полимеров и течение полимеров в каналах. – М.-Ижевск: Издательство «РХД», 2008. – 264 с.
7. Navier C.L.M.H. M'emoire sur les Lois du Mouvement des Fluides // M'em. Acad. Sci. Inst. de France. – 1822. – Vol. 2, No. 6. – P. 389-440.
8. Navier C.L.M.H. Sur les lois du mouvement des fluids // M'em. Acad. R. Sci. inst. – 1827. – Fr. 6. – P. 389–440.
9. Борзенко Е.И., Дьякова О.А., Шрагер Г.Р. Исследование явления проскальзывания в случае течения вязкой жидкости в изогнутом канале // Вестник ТГУ, Механика. – 2014. – № 2(28). – С. 35–44.

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ НА УПРОЧНЕНИЕ МЕДИ

Соловей В. Д., Мушников А. Н.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения
Уральского отделения Российской академии наук,
д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация,
e-mail: SoloveiVD@yandex.ru*

Проведен эксперимент по осадке при комнатной температуре предварительно отожженных образцов из технической чистой меди. В исходном состоянии цилиндрические образцы имели диаметр 10 мм и длину 20 мм. Осадка образцов проводилась на универсальной испытательной машине УММ-5. Осадка осуществлялась квазистатически с постоянной нормальной скоростью деформации в направлении осадки, равной $0,002 \text{ с}^{-1}$. Для более точного учета жесткости испытательной машины записывались не только диаграммы сжатия медных образцов, но и диаграмма сжатия стальных образцов, имеющих такие же размеры. Кроме того, при испытании медных образцов записывались диаграммы разгрузки.

Используя результаты проведенного эксперимента, построена кривая упрочнения меди при сжатии со скоростью осадки $0,002 \text{ с}^{-1}$.

В работе [1] приведены диаграммы упрочнения для осадки меди со скоростями деформации 0,002; 0,016; 150,0; 2000,0; 13 300,0 с^{-1} . Там же приводятся данные о влиянии скорости деформации на сопротивление деформации меди.

В настоящей работе при использовании вышеупомянутой найденной кривой упрочнения меди для сжатия со скоростью деформации $0,002 \text{ с}^{-1}$ и результатов работы [1], построено аналитическое выражение, определяющее зависимость кривой упрочнения меди от скорости деформации в области скоростей деформации 0,002–13 300,0 с^{-1} . При выводе этой формулы применен метод, использованный в [2]. Полученное выражение может быть использовано при расчетах параметров технологических процессов обработки давлением меди в широком диапазоне скоростей деформаций.

Литература

1. Дьяков А. П., Ишуткин С. И., Соколов Л. Д. Скоростная зависимость прочностных характеристик некоторых металлов // Обработка металлов давлением : сборник. – 1973. – Вып. 1. – С. 28–32.
2. Solovei V. D., Loginov Y. N., Puzanov M. P. Evaluating the Flow Stress of Electrical Steel under Cold Rolling in Terms of the Strain-Rate Hardening Effect // AIP Conf. Proc. – 2016. – 1785. – 040075. – DOI: 10.1063/1.4967132.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕШЕНИЙ ТИПА БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Казаков А. Л.^{1,2}, Спевак Л. Ф.¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения
Уральского отделения Российской академии наук,

д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620034, Российская Федерация

²ИДСТУ СО РАН,

д. 134, ул. Лермонтова, г. Иркутск, 664033, Российская Федерация,

e-mail: kazakov@icc.ru; lfs@imach.uran.ru

Рассматривается краевая задача для нелинейного параболического уравнения [1, 2]:

$$u_t = uu_{xx} + \frac{1}{\sigma} u_x^2 \quad (1)$$

при заданном фронте тепловой волны

$$u|_{x=a(t)} = 0; a(0) = 0; a'(0) > 0. \quad (2)$$

Ранее авторами было установлено, что существуют решения задачи (1), (2) типа бегущей волны, которые могут быть представлены в следующем виде [3]:

$$u(t, x) = f(t)v(z); z = x - a(t), \quad (3)$$

где $f(t)$ – некоторая функция, форма которой зависит от закона движения фронта тепловой волны $x = a(t)$, а $v(z)$ является решением следующей задачи Коши:

$$vv'' + \frac{(v')^2}{\sigma} + v' + kv = 0; v(0) = 0; v'(0) = -\sigma; k = const. \quad (4)$$

Можно видеть, что в уравнении (4) при $z = 0$ множитель перед старшей производной обращается в нуль.

В работе предложен алгоритм решения задачи (4) итерационным методом граничных элементов с использованием метода двойственной взаимности [4, 5]. Проведен вычислительный эксперимент, результаты которого сопоставлены с решениями этой же задачи методом степенных рядов. Расчеты показали корректность разработанного алгоритма и его преимущество по сравнению с отрезками рядов. Выполнена интерпретация результатов с точки зрения исходной задачи (1), (2). Проведено сравнение полученных решений вида (3) с точными и приближенными решениями задачи (1), (2), найденными авторами ранее [6, 7].

Работа выполнена при частичной поддержке Комплексной программы УрО РАН, проект № 18-1-1-5.

Литература

1. Vazquez J. L. The Porous Medium Equation: Mathematical Theory. – Oxford Press, 2006. – 648 p.
2. Сидоров А. Ф. Избранные труды: Математика. Механика. – М. : Физматлит, 2001. – 576 с.
3. Казаков А. Л., Орлов Св. С., Орлов С. С. Построение и исследование некоторых точных решений нелинейного уравнения теплопроводности // Сибирский математический журнал. – 2018. – Т. 59, № 3. – С. 544–560.

4. Nardini D., Brebbia C. A. A New Approach to Free Vibration Analysis using Boundary Elements // *Applied Mathematical Modelling*. – 1983. – Vol. 7, № 3. – P. 157–162.
5. Spevak L. F., Nefedova O. A. Solving a two-dimensional nonlinear heat conduction equation with degeneration by the boundary element method with the application of the dual reciprocity method // *AIP Conf. Proc.* – 2016. – Vol. 1785. – P. 040077. – DOI: 10.1063/1.4967134.
6. Казаков А. Л., Спевак Л. Ф. Методы граничных элементов и степенных рядов в одномерных задачах нелинейной фильтрации // *Известия Иркутского государственного университета. Серия: Математика*. – 2012, № 2. – С. 2–18.
7. Казаков А. Л., Лемперт А. А. Аналитическое и численное исследование одной краевой задачи нелинейной фильтрации с вырождением // *Вычислительные технологии*. – 2012. – Т. 17, № 1. – С. 57–68.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РАСТВОРИТЕЛЕЙ ДЛЯ ОЧИСТКИ МЕТАЛЛООПТИКИ С ЦЕЛЬЮ УВЕЛИЧЕНИЯ ЕЕ РЕСУРСА

Филин С. А.¹, Рогалин В. Е.², Каплунов И. А.²

¹Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова,
д. 36, Стремянный пер., Москва, 117997, Российская Федерация

²Тверской Государственный университет,
д. 33, ул. Желябова, г. Тверь, 170100, Российская Федерация,
e-mail: Kaplunov.IA@tversu.rul.ru

Металлические зеркала широко используются в ИК оптике. В процессе эксплуатации их регулярно требуется очищать от пыли и других эксплуатационных загрязнений. Очистка зеркал мощных лазеров [1] необходима, так как загрязнения снижают порог оптической стойкости и, следовательно, ресурс работы зеркал.

Классификацию растворителей и их выбор с целью удаления загрязнений с поверхности металла целесообразно проводить на основе понятия «параметр растворимости» (δ), характеризующего отсутствием изменения энтропии смешения (ΔS^E) и объема ($\Delta V^E = 0$), равенством свободной энергии Гиббса, внутренней энергии и энтальпии ($\Delta G^E = \Delta U^E = \Delta H^E$). Для оптимальной смеси двух не взаимодействующих неполярных жидкостей свободная энергия смешения (ΔF_V^{cm}) равна

$$\Delta F_V^{cm} = (x_1\varphi_1 + x_2\varphi_2)(\delta_1 - \delta_2)^2 \varphi_1\varphi_2 + RT(x_1 \ln x_1 + x_2 \ln x_2), \quad (1)$$

где x_1, x_2 – мольные; φ_1, φ_2 – объемные доли компонентов.

Минимум изменения (ΔF_V^{cm}) при смешении достигается при равенстве параметров растворимости (δ) компонентов смеси. Чем меньше разность ($\Delta\delta$) у компонентов смеси, тем больше вероятность их полного смешения.

Формула (1) исходит из предположения, что ($\Delta V^E = 0$), но даже для растворов неполярных веществ при смешении изменения объема хотя и небольшие, но обычно ($\Delta V^E \neq 0$) и рассчитываются как

$$\Delta V^E = \beta \Delta U_V^E,$$

где β – коэффициент изотермического сжатия.

Поэтому разница парциальных мольных объемов непосредственно связана с коэффициентами активности

$$\Delta \bar{V}_i = \bar{V}_i - V_i^\circ = \beta RT \ln \gamma_i. \quad (2)$$

Используя (2), получим

$$\Delta G_P^E \cong G_P^E - P \Delta V^E - \left(\frac{1}{2} \beta V \right) (\Delta V^E)^2; \Delta U_P^E \cong U_P^E - \left[T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_V - P \right] \Delta V^E; \Delta S_P^E \cong S_P^E - \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_V \Delta V^E.$$

Введение специфических компонентов взаимодействия придает (δ) сбалансированное положение, исключая случай, когда сольватация играет определяющую роль. С макроскопической точки зрения (δ) близка к внутреннему давлению $\left[P_i = \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T \right]$, обладающему значительной универсальностью и оцениваемому из уравнения состояния

$$\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T \cong \delta^2 = T \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V - P.$$

Для расчета (δ) используют внутреннюю энергию испарения ($U_{\text{пар}}^V$) молярного объема (V^M). С учетом связи энергии ($U_{\text{пар}}^V$) и скрытой теплоты ($\Delta H_{\text{пар}}^V$) испарения выражение при температуре (T) для (δ) имеет вид:

$$\delta = \left(\frac{\Delta H_{\text{пар}}^V - RT}{V^M}\right)^{\frac{1}{2}}. \quad (3)$$

Из выражения (3) видно, что температурная зависимость (δ) невелика (степень « $1/2$ »). Обычно (δ определяют) при 25 °С по формуле

$$\Delta H_{298} = 99,23 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{моль}}\right) T_{\text{ëëî}} + 0,0837 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{моль}}\right) T_{\text{ëëî}}^2 - 12\,350 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{моль}}\right).$$

Для экспериментальной оценки (δ) применяется метод Гильдебранда, в котором используются зависимости для внутреннего давления, критических параметров, поверхностного натяжения и т.д.

Сравнение параметрической теории растворимости с экспериментом осуществлено для смесей неполярных и малополярных растворителей при комнатной температуре. Теплоемкость при постоянном давлении (Δc_p^E) согласуется с экспериментом, совпадая с точностью 10–20 % от тепловой энергии RT для большей части смесей неполярных веществ. Результаты не согласуются, когда максимальная величина (Δc_p^E) близка к данным для идеальных растворов и $< 0,2$ кДж/моль, что происходит, очевидно, вследствие неприменимости использования приближения Бертло.

Хотя параметрическая теория растворимости основана на представлении о дисперсионных силах и правиле Бертло, проведенными экспериментами было удовлетворительно подтверждено, что она справедлива и для полярных растворителей, и твердых тел, т. е. сходство в значениях (δ) дает более отрицательную по величине (G^E), обеспечивающую их взаимное смешение.

Вывод

Удаление загрязнений, присутствующих на поверхности металла (с учетом его коррозионных свойств) и обладающих разными физико-химическими свойствами, наиболее эффективно смесью неводных растворителей с (δ), близким к (δ) загрязнений.

Литература

Каплунов И. А., Роголин В. Е., Филин С. А. Analysis of laser-chemical cleaning of metal surfaces // Non-ferrous Metals. – 2015. – № 1. – P. 29–31.

К РАСЧЕТУ ТРУБЫ ИЗ НЕОДНОРОДНОГО УПРУГОГО МАТЕРИАЛА

Беляев А. Б., Хакимов А. Г.

*ИМех УФИЦ РАН, 71, пр-т Октября, Уфа, 450054, Российская Федерация,
e-mail: hakimov@anrb.ru*

Рассмотрено напряженно-деформированное состояние трубы из неоднородного упругого материала. Решение задачи представлено гипергеометрическими рядами. Представлены результаты вычислений для толстостенной неоднородной трубы, неоднородной оболочки и очень тонкой неоднородной оболочки. Аналитическое решение эффективно при анализе напряженно-деформированного состояния цилиндра с тонким неоднородным слоем.

Неоднородные материалы достаточно широко распространены в инженерной практике [1]. Многие конструкционные, строительные и другие виды материалов являются неоднородными вследствие условий их изготовления. Неоднородность бетонов, пластмасс и металлов или сплавов объясняется неравномерностью их созревания, полимеризации или остывания соответственно [2, 3]. Зависимость механических свойств многих материалов от координат может возникать и в процессе эксплуатации какого-либо изделия или конструкции в агрессивной среде, или при наличии радиации, тепла, влажности [1–6]. Механические свойства деформируемого материала при неоднородном напряженно-деформированном состоянии могут существенно зависеть от координат [1, 7, 8].

Учет свойств деформируемых неоднородных материалов связан с проблемой идентификации их механических свойств. С практической точки зрения эта проблема особенно важна для обеспечения безопасности химических производств и атомных энергетических установок. В качестве объекта исследования используется толстостенная труба из неоднородного упругого материала. Такой выбор можно считать обоснованным в силу того, что этот элемент конструкции используется очень широко и в последнее время получен ряд новых результатов, связанных с исследованием напряженно-деформированного состояния в толстостенных трубах из неоднородного упругого материала [9].

В неоднородном цилиндре радиальные напряжения меньше, чем в однородном. Радиальные перемещения в неоднородном цилиндре меньше, чем в однородном. Перемещения по толщине неоднородной оболочки изменяются незначительно, а радиальные перемещения неоднородной оболочки меньше, чем однородной. Радиальные напряжения в неоднородной оболочке меньше, чем в однородной оболочке. Тангенциальные напряжения по радиусу в неоднородной оболочке уменьшаются в большей степени, чем в однородной оболочке. Сильное отличие радиальных перемещений неоднородной и однородной оболочек можно использовать для определения параметров неоднородной оболочки.

Работа поддержана средствами государственного бюджета по госзаданию (№ 0246-2019-0088).

Литература

1. Роганова Н. А., Шарафутдинов Г. З. Об идентификации механических свойств неоднородных материалов // Изв. РАН. МТТ. – 2012. – № 4. – С. 89–96.
2. Колчин Г. Б. Расчет элементов конструкций из упругих неоднородных материалов. – Кишинев : Картя Молдовеняскэ, 1971. – 172 с.
3. Ломакин В. А. Теория упругости неоднородных тел. – М. : Изд-во МГУ, 1976. – 367 с.
4. Локощенко А. М. Ползучесть и длительная прочность металлов в агрессивных средах. – М. : Изд-во МГУ, 2000. – 178 с.
5. Ильюшин А. А., Ленский В. С. Сопrotивление материалов. – М. : Физматлит, 1959. – 371 с.
6. Олышак В., Рыхлевский Я., Урбановский В. Теория пластичности неоднородных тел. – М. : Мир, 1964. – 156 с.
7. Ильюшин А. А. Пластичность. – М.; Л. : Гостехиздат, 1948. – 376 с.
8. Трелоар Л. Физика упругости каучука. – М. : Изд-во иностр. лит., 1953. – 240 с.
9. Шарафутдинов Г. З. Некоторые осесимметричные задачи для упругой неоднородной толстостенной трубы // Вестн. МГУ. Сер. 1. Математика, механика. – 2008. – № 2. – С. 34–39.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РОГОВИЦЫ ГЛАЗА ЧЕЛОВЕКА НА ОСНОВЕ МЕТОДА ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Бабайлов Н. А.¹, Богачев А. Е.², Нефедова О. А.¹, Спевак Л. Ф.¹

¹ИМАШ УрО РАН, д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620034, Российская Федерация,

²УГМУ, д. 3, ул. Ретина, г. Екатеринбург, 620109, Российская Федерация

e-mail: fupi_vs@el.ru; dr.a.bogachev@yandex.ru; nefedova@imach.uran.ru; lfs@imach.uran.ru

Работа посвящена разработке математических моделей и алгоритмов на их основе, описывающих поведение роговицы глаза человека под действием внутриглазного давления и внешних воздействий.

Актуальность представленной работы связана, в частности, с насущными проблемами офтальмологии по лечению дальнозоркости. Наиболее эффективным средством лечения дальнозоркости является лазерная коррекция зрения, состоящая в изменении формы роговицы. Математическая модель позволяет оценить состояние роговицы после проведения операции.

В основе предлагаемой модели лежит расчет напряженно-деформированного состояния роговицы глаза человека через решение статической краевой задачи теории упругости: в области Ω , занимаемой роговицей:

$$\sigma_{ij,i} = b_j; \quad (1)$$

$$\varepsilon_{ij} = (u_{j,i} + u_{i,j})/2; \quad (2)$$

$$\sigma_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} + \frac{2\mu\nu}{1-2\nu}\varepsilon\delta_{ij}, \quad (3)$$

– на внутренней поверхности Γ_1 задано внутриглазное давление

$$f_i = f_i^*, \quad (4)$$

– на внешней поверхности Γ_2 действует атмосферное давление

$$f_i = 0, \quad (5)$$

– на поверхности соединения роговицы и склеры Γ_3 задано жесткое закрепление

$$u_i = 0. \quad (6)$$

Задача (1)–(6) решена в осесимметричной постановке методом граничных элементов. Соответствующие задаче граничное интегральное уравнение и фундаментальное решение были рассмотрены в цилиндрической системе координат. Коэффициенты системы линейных алгебраических уравнений, полученной в результате дискретизации граничного интегрального уравнения, содержат интегралы по граничным элементам от специальных функций – полных эллиптических интегралов первого и второго рода. Эти интегралы вычислены численно с помощью простой квадратурной схемы Гаусса, за исключением интегралов по элементам, содержащим точки сингулярности эллиптических интегралов. При вычислении сингулярных интегралов использован адаптивный алгоритм численного интегрирования, учитывающий известные координаты особых точек.

Разработанный алгоритм решения был реализован в виде программы, написанной на языке программирования C++ с использованием технологий параллельного программирования. Для выполнения численных расчетов использована библиотека GSL, а для реализации параллельных вычислений – стандарт OpenMP. Работа программы была проверена на тестовых задачах, имеющих аналитическое решение.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ПРОЧНОСТИ ОКАТЫШЕЙ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ ОБЖИГЕ

Бобков В. И., Дли М. И., Якименко И. В.

*Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске,
д. 1, Энергетический проезд, Смоленск, 214013, Российская Федерация
e-mail: yovabobkoff@mail.ru*

Производство высококачественных окатышей из мелкодисперсного рудного сырья в металлургической и фосфорной промышленности позволяет утилизировать техногенные отходы, скопившиеся в отвалах горно-обогатительных предприятий, и поэтому служит примером ресурсосберегающей экологически безопасной технологии. Управлять процессом получения окатышей можно посредством повышения степени декарбонизации в процессе их высокотемпературного обжига, снижения расхода энергии и доли возврата некондиционных окатышей, обусловленного низкой прочностью. Так как производство окатышей сопровождается большими энергетическими затратами, повышение эффективности использования тепловой и электрической энергии и одновременно качества конечного продукта – весьма важная научно-практическая задача на современном этапе.

Экспериментальные исследования процессов спекания и увеличения прочности фосфоритовых окатышей свидетельствуют о многообразии сопровождающих его физико-химических превращений. В их число входят полиморфные превращения, химические реакции в твердых фазах, реакции с участием жидкой фазы, образование в результате реакций новых фаз и твердых растворов.

Исследования спекания порошковых прессовок из тонко измельченного фосфорита с удельной поверхностью 333–336 м²/кг проводились с использованием дериватографа при скоростях нагрева, соответствующих процессам на реальных обжиговых машинах в неизотермических условиях. Образцы сферической формы диаметром 8–10 мм получали путем прессования под давлением, которое обеспечивало их исходную плотность. Материал перед прессованием предварительно увлажняли до содержания влаги 10–11 %.

При нагреве фиксировали температуру на поверхности образца и убыль веса. Однотипные образцы поочередно нагревали до необходимых температур и затем выдерживали при конечной температуре до полного прогрева. После охлаждения измеряли их прочность. Результаты эксперимента позволяют заключить, что для всех спеченных образцов наблюдается повышение прочности материала с увеличением конечной температуры нагрева, а максимальный градиент увеличения прочности имеет место в диапазоне температур от 950 до 1100 °С, затем прочность снижается.

Одной из целей обжига окатышей является достижение максимальной степени декарбонизации. Она проходит в области температур от 650 °С до 800 °С, наиболее интенсивно – от 700 °С до 770 °С, практически для любого химического состава, причем в образце, содержащем больше СаСО₃, реагирование проходит при несколько меньших температурах. Это связано с тем, что реакция декарбонизации является эндотермической и степень прокалики зависит от температуры и времени, поэтому чтобы нагреть образец до нужной постоянной температуры греющей среды требуется больше времени. Очевидно, что оптимальный режим достижения необходимой степени декарбонизации при заданном химсоставе следует искать при комплексном воздействии температуры и времени пребывания при этой температуре.

Как отмечалось выше, реакция декарбонизации оказывает влияние на прочность окатыша. Поэтому в области интенсивного реагирования наблюдается резкое уменьшение прочности. Причем, существуют области температур и содержания карбонатов, в которых процесс разупрочнения, вследствие химической реакции декарбонизации, не компенсируется спеканием и в результате окатыш ломается. При проектировании и выборе технологических режимов обжиговых агрегатов следует избегать эти температурно-временные области обжига и при нагреве окатышей проходить их по возможности за кратчайшее время. При более

высоких температурах обжига процессы спекания и разупрочнения компенсируют друг друга, если не реализуются условия термического разрушения.

Используя полученные результаты, можно обоснованно оценить температурный режим обжига окатыша данного химсостава для достижения необходимой степени декарбонизации и приемлемой прочности.

Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки России на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности, проект № 13.9597.2017/БЧ

О ВЛИЯНИИ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ И ЕГО ШЕРОХОВАТОСТИ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ПОЛЫХ ВАЛОВ И ОСЕЙ ИЗ ГОРЯЧЕКАТАНОЙ ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКИ

Дементьев В. Б., Засыпкин А. Д.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Удм ФИЦ Уральского отделения РАН,
д. 34, ул. Т. Барамзиной, г. Ижевск, 426067, Российская Федерация
e-mail: oka592@rambler.ru

При изготовлении упрочненных цилиндрических осесимметричных полых деталей, работающих в условиях знакопостоянного асимметричного изгибного нагружения (валы, оси, пальцы траков и т. п.), возникает проблема зарождения усталостной трещины на внутренней поверхности детали, приводящей к разрушению. Это явление характерно при использовании в качестве заготовки горячекатаных (г/к) особотолстостенных труб из легированных углеродистых сталей (30ХГСН2А, 38ХС и т. п.) в процессе высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО), когда наружная поверхность обрабатывается наилучшим образом ($R_a < 1,25$), в то время как внутренняя поверхность упрочненной заготовки не обрабатывается, так как представляет определенные технологические трудности. Это и высокая твердость поверхности после ВТМО (HRC₃ 55...57 ед.), и неравномерное распределение припуска на механическую обработку по длине отверстия, и большая протяженность заготовок (≥ 500 мм). Создание условий равной вероятности зарождения трещины на наружной и внутренней поверхности позволило бы достигнуть максимальной величины долговечности детали при эксплуатации. Для этого разработаны прогрессивные способы повышения качества поверхности трубного проката.

В предыдущих исследованиях была получена зависимость для расчета величины долговечности полых пальцев гусеничных машин:

$$N = A_0 + A_1 \text{EXP}(-(\Delta S^2 + H_{\min}^2 + (\lambda - 30)^2)/300),$$

где $A_0 = -285,72$ и $A_1 = 2290,34$; ΔS – относительная поперечная разностенность на участке приложения максимального изгибающего момента; H_{\min} – максимальная глубина впадин на этом участке; λ – степень деформации по обжатию при ВТМО винтовым обжатием (ВО).

Полученная зависимость позволяет прогнозировать эксплуатационные свойства (долговечность) готовых деталей, изготовленных по схеме ВТМО ВО в зависимости от исходных характеристик поверхности заготовок и режимов упрочняющей (окончательной) обработки, что позволяет, в свою очередь, определить оптимальный маршрут их изготовления для повышения качества поверхности.

Эксплуатационные показатели, как неоднократно отмечалось, зависят не только от геометрических характеристик поверхности, но и от физико-механических свойств поверхностного слоя. Исследования по изучению качества внутренней поверхности показали, что большое влияние на физико-механические характеристики стали оказывает технология изготовления и последовательность операций в ней.

Показаны вероятные очаги зарождения усталостной трещины при асимметричном знакопостоянном изгибе на внутренней поверхности при испытании полых цилиндрических деталей, изготовленных из горячекатаных труб. Получена зависимость долговечности трубных изделий от шероховатости внутренней поверхности. Показано, что снижение шероховатости внутренней поверхности до $R_{\max} \leq 10$ мкм совместно с сочетанием структуры поверхностного слоя (мартенсит + троостомартенсит) на глубине до 2 мм создает условия максимального повышения ресурса полых деталей при различных видах нагружения (изгиб, износ поверхности, кручение и их сочетание).

НАПЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТИТАНОВОЙ ОБОЛОЧКИ В АГРЕССИВНОЙ СРЕДЕ

Емельянов И. Г., Миронов В. И.

*Институт машиноведения УрО РАН,
д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация*

Понижение физико-механических свойств материалов при контакте с агрессивными средами является одним из факторов, который определяет прочность и ресурс различных конструкций в процессе эксплуатации. Цель работы – определение влияния агрессивной водородосодержащей среды на механические свойства и напряженное состояние титановой оболочки. Решена диффузионная задача и найдено распределение концентрации водорода по стенке оболочки. Затем определяется напряженное состояние оболочечной конструкции. Объект исследования представлен в виде составной оболочки вращения, нагруженной внутренним давлением и работающей в водородосодержащей среде. В общем случае задача определения напряженного состояния данной тонкостенной конструкции при заданных условиях является нестационарной и связанной. В предложенном феноменологическом подходе связь между диффузионной и механической задачами заключается в учете изменения диаграммы деформирования для титановых образцов при различных концентрациях водорода. Краевая задача диффузии водорода решена с использованием метода конечных элементов. Интегрирование системы дифференциальных уравнений краевой задачи по определению напряженного состояния оболочки выполнено методом дискретной ортогонализации С.К. Годунова. Установлено, что водород существенно снижает несущую способность конструкции и меняет характер разрушения от вязкого к хрупкому.

**A COMPARATIVE STUDY OF HIGH-TEMPERATURE CREEP
IN VT-5-1 TITANIUM ALLOY SAMPLES UNDER STEPWISE HEATING TO 1323 K
IN A HYDROGEN ENVIRONMENT AND IN AIR**

L. M. Zamaraev

*Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
34 Komsomolskaya St., Ekaterinburg, 620049, Russian Federation*

The aim of this paper is to study the effect of hydrogen on the regularities in the short-term high-temperature creep of the Ti-5Al alloy as compared to the results of studying creep in the air environment.

For the environments under study, the empirical coefficients in the Dorn relationship $v = Ay^n \exp(-\Delta H/RT)$ relating creep rate v to temperature T , to the nominal stress y , and to the creep activation energy ΔH have been obtained, as well as the empirical coefficients in the dependence determining the temperature of the onset of creep deformation.

During the research, the creep rate in hydrogen has been determined to be lower than in air in the largest part of the test temperature range, *ceteris paribus*.

When heating in hydrogen, a local zone of creep rate increase is observed.

Heating in hydrogen, as compared to heating in air, has been found to decrease conventional creep strength, nominal stresses being the same in the whole test temperature range.

ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ ДЕФОРМИРУЕМЫХ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ПОКРЫТИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ЭЛАСТИЧНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Морозов И. А.¹, Каменецких А. С.²

¹*Институт механики сплошных сред УрО РАН филиал Пермского научного центра,
д. 1, ул. ак. Королева, г. Пермь, 614013, Российская Федерация
e-mail: ilya.morozov@gmail.com*

²*Институт электрофизики УрО РАН
д. 106, ул. Амундсена, г. Екатеринбург, 620016, Российская Федерация*

Плазменная модификация поверхности жестких материалов позволяет целенаправленно улучшать свойства необработанной поверхности. Этой тематике посвящено большое количество исследований. Одним из распространенных видов плазменной обработки является нанесение углеродного слоя на поверхность материала или карбонизация самой поверхности под действием газовой плазмы. В зависимости от назначения, материал приобретает те или иные перспективные свойства: повышенную твердость, износостойкость, биомедицинские характеристики и т. п. В случае мягких полимеров преимущества такой обработки оказываются не столь очевидными, так как внешняя деформация разрушает жесткое покрытие, это в свою очередь может привести к макроскопическим повреждениям материала подложки.

Полиуретаны, благодаря широкому диапазону термомеханических свойств от твердых пластиков до эластомеров, нашли широкое применение в самых различных человеческой деятельности. Уникальные свойства обработанных плазмой поверхностей могут быть использованы для создания биомедицинских изделий с улучшенными антибактериальными свойствами: наши исследования показали, что адгезия бактерий стафилококка и кишечной палочки к обработанным плазменной имплантацией ионов азота полиуретанам снижается в несколько раз; в первую очередь это связано с изменением структуры рельефа поверхности (образуется развитая структура хаотичных складок), а также смачиваемостью.

В результате циклической одноосной деформации на обработанных плазмой поверхностях полимера появляются поперечные оси нагружения трещины и продольные складки. Эксперименты на бактериальную адгезию к таким поврежденным материалам показали увеличение числа бактерий до величин, превышающих их количество на необработанных материалах: образовавшиеся дефекты поверхности оказали благоприятное влияние на рост бактериальных пленок.

Решением данной проблемы может быть модификация поверхностного слоя материала толщиной в несколько атомов с использованием низкоэнергетической плазменной ионной имплантации.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-48-590057_p_a.

ВЛИЯНИЕ НАПОЛНИТЕЛЯ НА ДЕМПФИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА БАЛКИ

Миронов В. И.^{1, а)}, Огорелков Д. А.^{1, 2, б)}, Козлов П. В.², Яковлев В. В.²

¹Институт машиноведения УрО РАН, г. Екатеринбург, Российская Федерация

²Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация

e-mail: ^{а)}visim.vm@mail.ru; ^{б)}ogorelkov.dimon@yandex.ru

При производстве машин и оборудования актуальны требования повышения ресурса, улучшения эргономических свойств (например снижения уровня шума и вибраций), что достигается, например, снижением динамики машин. Данная задача в подъемных и горных машинах решается разными способами: внедрением частотных приводов, изменением конструкции, использованием материалов с улучшенными механическими характеристиками, внедрением активного демпфирования и другими способами. Для пролетных и консольных тонкостенных конструкций предлагается использовать с этой целью объемное демпфирование низко модульным энергоемким пеноматериалом.

В статье приводятся результаты исследования влияния низко модульного наполнителя (монтажная пена) на демпфирующие свойства консольной тонкостенной балки. Для решения поставленной задачи был выполнен частотный анализ в вычислительном пакете SolidWorks. Приводится аналитическое выражение, по которому при известном декременте не заполненной балки δ_1 можно вычислить декремент запененной δ_2 балки, определив собственные частоты пустой ω_1 и запененной ω_2 балок с помощью любого стандартного вычислительного комплекса. При аналитических вычислениях показано, что при увеличении толщины стенки эффективность конструкции снижается.

Для экспериментальной проверки использовалась высокоскоростная записывающая камера в сотовом телефоне Samsung Galaxy S9; эксперименты выполнялись в лаборатории технической диагностики ИМАШ УрО РАН. Получены экспериментальные виброграммы пустой и запененной балки и определен опытный декремент δ_2 .

В целом экспериментальная проверка показала приемлемость предлагаемого подхода для инженерной оценки эффективности объемного демпфирования исследуемой металлоконструкции:

- значительно повышается логарифмический декремент затухающих колебаний;
- уменьшается собственная частота конструкции и число значимых циклов, определяемое снижением амплитуды колебаний на 90 %, что повышает ее общую долговечность;
- как следствие, уменьшается общее время затухания свободных колебаний, что полезно для машин точного позиционирования.

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНЫХ ТРУБ

Москвина Е. Ю., Сызранцева К. В.

*Тюменский Индустриальный Университет, 70, Мельникайте, Тюмень, 625048,
e-mail: moskvinaej@tyuiu.ru; kv.syzr@gmail.com*

В работе представлена разработка одного из критериев диагностирования насосно-компрессорных труб (НКТ) и обоснование возможности его применения для определения дефектов на теле НКТ при помощи виброакустического метода в промышленных условиях при ремонте скважин.

Критерии диагностирования представляют собой результаты анализа временной и частотной картин вибрации. Использовался метод следящего спектрального анализа, диагностическими признаками которого являются изменение спектральных составляющих сигнала, появление комбинационных частот, которые отражают геометрию элементов и взаимосвязь между ними. Проанализировали спектральные картины различных труб (73×5-Е): исправная новая труба; исправная труба, бывшая в эксплуатации; дефектная труба с натуральным дефектом в виде отверстия; дефектная труба с парафиновой пробкой; дефектная труба с поперечным пропилом; дефектная с продольным пропилом; дефектная со снятым металлом; дефектная труба с трещиной.

Установлены зависимости собственных частот трубы от расположения наиболее распространенных дефектов: истирание металла, отверстие, продольные и поперечные трещины.

Показано, что по спектру вибросигнала можно делать заключение о месте расположения дефекта типа поперечной трещины на теле НКТ. Комбинационные частоты появляются в спектре колебаний трубы с поперечной трещиной. При наличии поперечной трещины труба как бы разделена на две части. В частотной картине отражаются колебания трубы и двух ее частей. Если трещина близко у края, то размер одной из этих частей почти равен длине всей трубы, поэтому близко расположены характерные гармоники. Так как собственная частота однозначно зависит от длины стержня, при известном порядке гармоник, и разницы между ними, можно судить о местонахождении дефекта на теле трубы. Таким образом, в спектре колебаний трубы собственная частота трубы указывает на составляющие для определения местоположения трещины. Понятно, что такой метод распознавания трещин будет работать в том случае, если длины частей трубы сравнимы между собой.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСОКОГРАДИЕНТНЫХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ МЕТОДОМ СВЕРЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ

Одинцев И. Н.¹, Плотников А. С.², Каракозов Е. В.³

¹ИМАШ РАН, 4, Малый Харитоньевский пер., Москва, 101000, Российская Федерация

e-mail: ino54@mail.ru

²НИЯУ МИФИ

³Московский политехнический университет

Известно, что наличие в элементах конструкций остаточных (начальных) напряжений (ОН) может оказывать существенное воздействие на их фактические прочностные характеристики. В большинстве случаев достоверное определение уровней и пространственных распределений ОН осуществляется путем экспериментальных исследований. Наиболее широко применяемым на практике инструментом для этого является метод сверления зондирующих отверстий. Компоненты ОН в точках засверловки рассчитываются по локальным деформационным откликам нагруженного материала с использованием заранее установленных (вычисленных) функций влияния от единичных значений параметров напряженного состояния.

Эффективным средством измерения деформационного отклика в зоне отверстия является бесконтактный оптический метод электронной (цифровой) спекл-интерферометрии. С его помощью визуализируются и оцифровываются поля компонент вектора перемещений на поверхности объекта с высокой точностью (с порогом чувствительности $\sim 0,1$ мкм и менее). Большой объем получаемой первичной экспериментальной информации способствует существенному повышению адекватности итоговых результатов. Благодаря континуальному формату регистрируемых перемещений появляется возможность построения интерпретационных моделей, наиболее полно учитывающих вклады от различных влияющих факторов, а при необходимости расширяющих их количественный и качественный состав.

Напомним, что традиционная для метода отверстий механическая модель постулирует наличие в зоне сверления однородного поля ОН. Такой подход является единственно возможным, если параметры отклика (в виде трех пространственных компонент деформаций) регистрируются с помощью малобазной розетки тензорезисторов. Вместе с тем данная простейшая модель может стать несостоятельной при исследованиях высокоградиентных полей ОН (например в окрестности сварных швов). В этих случаях изменение компонент напряжений даже на базе малоразмерного отверстия-индикатора может оказывать достаточно существенное влияние на вид и форму деформационного отклика в его полевом представлении. Очевидно, что тензометрический метод принципиально не позволяет установить данный факт, а получаемый после стандартной обработки первичной информации условно усредненный результат будет зависеть от конкретной ориентации тензорезисторов в розетке по отношению к направлениям градиентов компонент ОН. Регистрируемые с помощью метода спекл-интерферометрии картины полос, визуализирующие в частности поля тангенциальных перемещений, наглядно демонстрируют возможную неоднородность распределения ОН и дают исходную информацию для ее количественного описания.

Для повышения информативности итоговых результатов предложена модифицированная интерпретационная модель, базирующаяся на представлении локальных полей компонент ОН в виде линейных приближений с варьируемыми коэффициентами. Функции влияния включенных в нее членов на полевой деформационный отклик материала при засверловке отверстия-индикатора рассчитывались с использованием метода конечных элементов. Путем численных экспериментов (с заданием характерных значений погрешности измерения перемещений интерференционным методом) произведена статистическая оценка пороговых уровней градиентов полей компонент ОН, при которых на этапе обработки первичных данных необходимо учитывать их наличие. Это позволяет уже по начальному качественно-количественному анализу интерферограмм определять число необходимых дополнительных членов интерпретационной модели в каждом конкретном случае.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-08-00572.

ИЗНОСОСТОЙКИЕ МНОГОКОМПОНЕНТНЫЕ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ МАТРИЦЫ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПЭ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ МЕТОДОМ FUSED DEPOSITION MODELING

Панин С. В.^{1,2}, Бочкарева С. А.¹, Буслович Д. Г.^{1,2}, Корниенко Л. А.¹, Донцов Ю. В.²

¹*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН. Академический пр., 2/4, г. Томск, 634055, Российская Федерация
e-mail: svp@ispms.tsc.ru*

²*Национальный Исследовательский Томский политехнический университет
д. 30, пр. Ленина, г. Томск, 634050, Российская Федерация*

Выполнен структурно-функциональный анализ антифрикционных термопластичных композитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ), разрабатываемых с целью создания расходных материалов для аддитивных технологий производства узлов трения сложной формы, работающих в экстремальных условиях эксплуатации (низкие температуры, агрессивные среды, высокие скорости и нагрузки). С целью придания экструдиремости СВМПЭ при сохранении базовых характеристик на уровне ненаполненного полимера решалась задача оптимального выбора полимерных пластификаторов из числа промышленно выпускаемых термопластов.

С целью эффективной (ускоренной) разработки экструдирруемых композитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) при минимальном количестве экспериментальных данных предложен алгоритм определения управляющих параметров (рецептуры), придающих требуемые (ограничительные) значения эффективным характеристикам многокомпонентных полимер-полимерных композиций. На основе анализа данных экспериментальных исследований по определению эффективных характеристик, в зависимости от значений управляющих параметров, в пространстве состояний строятся соответствующие поверхности отклика. Полученные поверхности позволяют выявить область значений управляющих параметров для гарантированного достижения заданных характеристик трибомеханических и технологических свойств многокомпонентных композиций.

С помощью указанного алгоритма проведено определение оптимальной рецептуры трехкомпонентной смеси «UHMWPE + 17 вес. % HDPE-g-SMA + 12 вес. % PP», обладающей трибомеханическими свойствами на уровне ненаполненного СВМПЭ, но одновременно текучестью расплава, пригодной для 3D-печати методом Fused Deposition Modelling. Проведен сравнительный анализ структуры, механических и трибологических свойств многокомпонентной полимер-полимерной композиции «UHMWPE + 17 вес. % HDPE-g-SMA + 12 вес. % PP», полученной методами FDM-печати (послойной экструзионной печати) и горячего прессования.

Показано, что экструдирруемые композиты на основе СВМПЭ, полученные методом 3D-печати, по совокупности трибомеханических свойств превосходят аналогичные характеристики композитов, полученных компрессионным спеканием, что связано с формированием более однородной надмолекулярной структуры, прежде всего за счет двухшнекового компаундирования. Также на основе экструдирруемой многокомпонентной полимер-полимерной матрицы на основе СВМПЭ изготовлены композиты, содержащие в качестве наполнителя углеродные нано- и микроволокна, гидроксиапатит, стекловолокна. Исследованы триботехнические характеристики высокопрочных и антифрикционных композитов, полученных 3D-печатью, в различных условиях трибонагружения ($P \cdot V$). Показано, что композиты, полученные методом FDM-печати, могут быть использованы в узлах трения, работающих в широком диапазоне скоростей и нагрузок.

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРУЮЩИХ МИКРОДОБАВОК ZN, CU, C НА ПРОЦЕСС УПЛОТНЕНИЯ ПОРОШКОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА

Поляков П. А., Поляков А. П., Мичуров Н. С.

*Институт машиноведения УрО РАН,
д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация
e-mail: pavel.katsu@gmail.com*

Преобладающее место в порошковой металлургии занимают детали общемашиностроительного назначения на основе железа, составляющие по стоимости примерно 30 % в общем объеме производства. При этом в таких отраслях, как автомобилестроение, машиностроение, порошковая металлургия является более предпочтительной по сравнению с традиционными технологиями. Важным технологическим приемом повышения плотности и прочности порошковых деталей на основе железа является рациональное легирование шихты, совершенствование смазок и пластификаторов. Данный подход актуален для процесса формирования таких порошков как ванадиевое железо, обладающее плохой прессуемостью.

Для исследований были выбраны порошковые композиции, полученные механическим смешиванием природно-легированного ванадийсодержащего порошка железа в смеси с Zn, Cu, C в количестве 1,5 мас. % на измельчителе вибрационном ИВ-микро в ИМЕТ УрО РАН в течение 2 ч. Выбор добавок обусловлен тем, что элементы Zn, Cu, C можно рассматривать как твердые смазки при прессовании, кроме того, эти добавки являются традиционными для легирования железа (кроме цинка).

Данные о гранулометрическом составе и морфологии исходных порошков получены в Институте металлургии УрО РАН на анализаторе частиц CAMSIZER-XT (Retsch Technology, Германия), погрешность измерений ± 10 %, для частиц графита использован лазерный анализатор размеров частиц HORIBA LB5 550 (HORIBA JOBIN YVON, Япония).

Образцы для исследования прочностных характеристик изготовлены на оборудовании ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН, на универсальной гидравлической машине Tinius Olsen Super L60. Навески порошка массой 8 г брикетировали односторонним прессованием в пресс-форме диаметром 9,6 мм при комнатной температуре и давлении 1000 МПа.

В процессе механического смешивания произошло налипание частиц порошка легирующих добавок на порошки железа, кроме того, было обнаружено частичное разрушение окисной пленки на поверхности частиц. Разрушение окисной пленки привело к адгезионному схватыванию порошка исходного материала с порошками легирующих добавок Zn и Cu. Применение микрорентгеноспектрального анализа для определения химического состава поверхностей частиц полученных композиций подтвердило, что налипшие частицы являются частицами порошков цинка, меди и углерода соответственно.

Добавки меди, цинка и графита способствуют лучшему уплотнению заготовок. Объясняется это тем, что для отдельных частиц материала основы (ванадийсодержащего порошка железа) наблюдается адгезионное схватывание с легирующими добавками в виде Zn, Cu и C. В данном случае указанные добавки выступают в качестве смазки для контактных поверхностей частиц и одновременно способствуют интенсификации схватывания межчастичных контактов, что должно положительно сказаться на прочности. Наилучшая уплотняемость достигается для состава с добавкой графита.

Для порошковых композиций на основе ванадийсодержащего порошка железа с микродобавками Zn, Cu и C исследован гранулометрический состав и морфология частиц. После механического смешивания на поверхности частиц наблюдается частичное разрушение окисных пленок. На отдельных частицах зафиксировано адгезионное схватывание с легирующими добавками. Установлено, что добавки порошков Zn, Cu и C положительно влияют на уплотняемость заготовок, при этом наилучшая уплотняемость достигается для состава с добавкой графита.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ТЕРМОБАРЬЕРНОГО ПОКРЫТИЯ

Пугачева Н. Б.¹, Гузанов Б. Н.², Обабков Н. В.³, Быкова Т. М.¹, Мичуров Н. С.¹

¹Институт машиноведения УрО РАН, 620049 Екатеринбург,

д.34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация

²Российский государственный профессионально-педагогический университет,

д. 11, ул. Машиностроителей, г. Екатеринбург, 620012, Российская Федерация

³Уральский федеральный университет,

д. 19, ул. Мира, Екатеринбург, 620002, Российская Федерация

e-mail: tatiana_8801@mail.ru

Термобарьерные покрытия предназначены для снижения температуры поверхности деталей в процессе эксплуатации, например лопаток газотурбинных двигателей. Как правило, такие покрытия состоят из диоксида циркония ZrO_2 , стабилизированного Y_2O_3 . Введением добавки Y_2O_3 можно предотвратить полиморфные превращения и сохранить при комнатной и даже более низкой температуре кубическую или тетрагональную фазу. Содержание оксида иттрия 6–8 мас. % отвечает более высокой термической стойкости плазменно напыленных покрытий. Недостатком этих покрытий является низкая адгезионная прочность. Существует ряд технологических решений, позволяющих повысить сцепление покрытия с металлической основой. Наиболее широко распространено нанесение промежуточных металлических слоев состава Ni-Cr-Al-Y между образцами или деталями и внешним керамическим слоем для увеличения его адгезии и снижения различий коэффициентов термического расширения между керамикой и основой. Цель работы заключалась в исследовании структуры и адгезионной прочности многослойного термобарьерного покрытия состава ZrO_2 -7 мас. % Y_2O_3 .

Покрытия наносили на жаропрочный никелевый сплав марки ЭП975 ИД, применяемый для изготовления дисков и лопаточного аппарата газотурбинных двигателей. Керамическое термобарьерное покрытие состава ZrO_2 -7 мас. % Y_2O_3 методом плазменного напыления. С целью повышения прочности его сцепления со сплавом-основой предварительно проводили диффузионное алюмосилицирование поверхности образцов, затем наносили металлический подслоя из сплава (мас. %) Ni-22%Cr-13%Al-1%Y методом плазменного напыления. Строение покрытия исследовали на сканирующем электронном микроскопе TESCAN с энергодисперсионной приставкой OXFORD для микрорентгеноспектрального анализа. Рельеф поверхности определяли на оптическом интерферометре Veco, микротвердость – на твердомере LEICA. Адгезионную прочность покрытия оценивали по результатам растяжения клеевого соединения пластины с покрытием и контрольного образца со скоростью 1 мм/мин на сервогидравлической испытательной машине INSTRON 8801.

Для повышения жаростойкости термобарьерных покрытий перед плазменным напылением подслоя и керамического слоя проводили термодиффузионное алюмосилицирование поверхности образцов из никелевого сплава. При этом сформировалось покрытие, состоящее из алюминидов NiAl микротвердостью 900 HV 0,05, толщиной от 80 до 120 мкм, шероховатость поверхности $Ra = 9$ мкм. После диффузионного алюмосилицирования изменился химический и фазовый состав поверхностного слоя никелевого сплава, а алюмосилицидное покрытие сформировалось внутри образцов, не приводя к увеличению их размеров.

Для повышения адгезионной прочности сцепления второго напыленного металлического подслоя Ni-Cr-Al-Y с алюмосилицированной поверхностью образцов была проведена ее пескоструйная обработка таким образом, чтобы толщина алюмосилицированного слоя была не менее 50 мкм. После пескоструйной обработки $Ra = 3$ мкм. Толщина второго напыленного металлического подслоя Ni-Cr-Al-Y 100 мкм, микротвердость порядка 600 HV 0,05, он состоит из алюминидов NiAl и твердого раствора на основе Ni, $Ra = 6$ мкм. Покрытие достаточно плотное, пористость его менее 5 об. %. Внешний керамический слой толщиной 70

мкм состоит из оксидов циркония ZrO_2 и иттрия Y_2O_3 . Общая толщина многослойного покрытия составила 0,22 мм.

В ходе испытаний клеевого соединения плоского образца с покрытием и контрольного образца на растяжение было зафиксировано разрушение образцов по клеевому соединению, сколов и отслоений покрытия не обнаружено, что позволило оценить адгезионную прочность покрытия выше 12 МПа. Следует отметить, что при нанесении керамического слоя непосредственно на жаропрочный никелевый сплав происходило разрушение клеевого соединения по керамическому слою в первые секунды испытаний.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме АААА-А18-118020790145-0.

О ВОЗМОЖНОСТИ МУЛЬТИМОДАЛЬНОГО ДЕМПФИРОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ С ПОМОЩЬЮ ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТА, ШУНТИРОВАННОГО RL -ЦЕПЬЮ

Севодина Н. В., Юрлова Н. А., Ошмарин Д. А., Юрлов М. А.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН,
д. 1, Академика Королева, Пермь, 614013, Российская Федерация
e-mail: natsev@icmm.ru; yurlova@icmm.ru; oshmarin@icmm.ru; yurlov@icmm.ru*

Одним из перспективных подходов, используемых в настоящее время для управления динамическими характеристиками конструкций, является дополнение конструкции элементами, выполненными из пьезоэлектрических материалов и соединенными с внешними электрическими цепями. Пьезоэлектрический элемент выступает в данном случае как преобразователь механической энергии колебаний в электрическую энергию, которая затем рассеивается во внешней электрической цепи в виде тепла и электромагнитного излучения. Варьируя значения параметров элементов цепи, можно добиться существенного снижения амплитуды колебаний конструкции на резонансных частотах, либо требуемой скорости затуханий заданных мод колебаний при воздействии неперiodических нагрузок.

Для управления колебаниями конструкции на нескольких частотах используется множество способов, среди которых можно выделить следующие: несколько пьезоэлементов, каждый из которых соединен со своей электрической цепью; сетка пьезоэлементов, которые объединены в единую сложную разветвленную электрическую цепь. Подобного рода конфигурации демпфирующих устройств, как правило, очень сложны в настройке и крайне негативно сказываются на весовых характеристиках получаемой системы. Поэтому вопрос о реализации демпфирования нескольких мод колебаний одними и теми же минимальными средствами, не теряет своей актуальности.

Самая простая конфигурация электромеханического демпфера представляет собой пьезоэлемент, зашунтированный пассивной последовательной либо параллельной R - (содержащей только сопротивление) или RL -цепью (содержащей элементы сопротивления и индуктивности). Подобного рода демпферы при условии соответствующих расположения пьезоэлемента на конструкции и значений параметров элементов шунтирующей цепи позволяют добиться требуемых характеристик динамического поведения конструкций (амплитуда колебаний либо скорость затухания колебаний), но только для одной резонансной частоты колебаний.

В работе предложен и численно продемонстрирован способ, позволяющий оценить возможность и целесообразность использования одного пьезоэлемента для реализации стратегии управления динамическим поведением электроупругой конструкции в некотором частотном диапазоне. Он включает два этапа: определение места расположения пьезоэлемента на поверхности конструкции и определение параметров внешней электрической цепи, подключаемой к его электродированным поверхностям. Определение оптимальных параметров на каждом этапе основано на решении задачи о собственных колебаниях электроупругих тел с внешними электрическими цепями.

Рассмотрено приложение задачи о собственных колебаниях кусочно-однородных тел, содержащих пьезоэлементы и внешние электрические цепи, для поиска вариантов, обеспечивающих повышение диссипативных свойств таких систем на нескольких модах колебаний (мультимодальное демпфирование) при наличии одной внешней цепи, состоящей из индуктивного и резистивного элементов. Предложенный подход основан на анализе мнимой части комплексных собственных частот колебаний, которая определяет показатель демпфирования соответствующих мод колебаний, получаемых решением задачи о собственных частотах колебаний электроупругих систем с внешними электрическими цепями. Поставленная задача решается методом конечных элементов (МКЭ) по разработанному авторами алгоритму, в котором для использования возможностей коммерческого пакета программ ANSYS написаны макросы на языке APDL и программы на языке FORTRAN.

Предлагаемый подход наиболее эффективен при соответствующем выборе места расположения пьезоэлемента, и представлен способ, позволяющий реализовать такое расположение пьезоэлемента.

Эффективность разработанного алгоритма продемонстрирована численно на различных объектах. Показано, что при реализации пассивной стратегии управления колебаниями конструкции с помощью зашунтированного пьезоэлемента, настроенного на демпфирование одной резонансной частоты, степень демпфирования моды колебаний, реализующейся на данной частоте, выше, но это влияние оказывается только на эту частоту. Тогда как при использовании предлагаемого алгоритма при подборе соответствующих параметров шунта влияние распространяется на несколько мод колебаний из рассматриваемого частотного диапазона, при этом степень демпфирования колебаний остается достаточно высокой.

Работа выполнялась при поддержке Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 18-31-00080_мол-а).

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ ИЗ ЭПОКСИДНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КЛЕЕВ МЕТОДОМ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ

Смирнов С. В., Веретенникова И. А., Смирнова Е. О., Пестов А. В.

ФГБУН Институт машиноведения УрО РАН,
д. 34, Комсомольская, Екатеринбург, 620049, Российская Федерация
e-mail: irincha@imach.uran.ru

Эпоксидные полимерные материалы достаточно часто используются в современной промышленности в качестве защитных покрытий металлических оснований и способствуют продлению их срока службы. Важными характеристиками при использовании полимерных материалов в качестве покрытий являются его высокие упругие свойства и твердость, а также восприимчивость к длительным локальным механическим воздействиям. Достаточно эффективным способом определения локальных механических свойств покрытий из эпоксидных материалов является метод инструментального индентирования. В работе проведено сравнительное исследование твердости, приведенного модуля упругости и показателя ползучести материалов покрытий из двух стандартных эпоксидных клеев и новой, предложенной ранее, адгезивной композиции, полученных методом инструментального индентирования.

Первый коммерческий клей представлял собой стандартный состав эпоксидного двухкомпонентного клея холодного отверждения. Вторым коммерческим клеем имел стандартный состав эпоксидного титансодержащего однокомпонентного клея горячего отверждения. Для создания адгезивной композиции использовали стандартный эпоксидный титансодержащий однокомпонентный клей горячего отверждения и отвердитель ПЭПА при массовом соотношении смола/отвердитель 10:1. Покрытия наносили на подложки из алюминиевого сплава АМг6 и стали 3.

Исследования проведены на комплексе Triboindenter TI 950. Индентирование проводили с использованием трехгранной пирамиды Берковича. Первичную обработку результатов испытаний осуществляли с помощью программного обеспечения прибора по методике Оливера-Фарра. В первой серии экспериментов исследовали влияние продолжительности цикла нагружения на твердость и нормальный модуль упругости. Во второй серии исследовали влияние времени нагружения при постоянно заданной нагрузке и оценивали показатель ползучести материалов.

Показано, что показатели твердости и модуля упругости новой адгезивной композиции находятся на одном уровне со свойствами наиболее прочного клея горячего отверждения, в то же время новая адгезивная композиция сильнее склонна к проявлению ползучести по сравнению со стандартными коммерческими клеями. Для клеев холодного отверждения наблюдается зависимость твердости от материала подложки, на которую они нанесены.

Установлено, что характеристики механических свойств, полученные методом инструментального индентирования, демонстрируют чувствительность к особенностям химического строения и надмолекулярной структуры отвержденных эпоксидных материалов. При этом разные характеристики механических свойств демонстрируют разную чувствительную способность к проявлению особенностей строения адгезивного материала. Установлено, что твердость и нормальный модуль упругости по сравнению с показателем ползучести более чувствительны к различиям в структуре материалов покрытий из клеев холодного и горячего отверждения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-19-00571) в части исследования свойств покрытий из эпоксидных клеев и в рамках выполнения госзадания по теме АААА-А18-118020790145-0 в части разработки методик исследования методом инструментального индентирования.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ПОЛИМЕРНОГО ПОКРЫТИЯ ПРИ ИНДЕНТИРОВАНИИ

Смирнов С. В.¹, Мясникова М. В.¹, Смирнова Е. О.¹, Коновалов Д. А.¹,
Пестов А. В.², Игумнов А. С.³

¹*Институт машиноведения УрО РАН,
д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация
e-mail: marina@imach.uran.ru*

²*Институт органического синтеза УрО РАН,
д. 22/20, ул. Софьи Ковалевской, г. Екатеринбург, 620137, Российская Федерация*

³*Институт математики и механики УрО РАН,
д. 16, ул. Софьи Ковалевской, г. Екатеринбург, 620108, Российская Федерация*

Для определения величины удельной предельной энергии адгезионного разрушения полимерных покрытий осуществлено численное моделирование напряженно-деформированного состояния полимерного покрытия при проведении испытаний по внедрению индентора Роквелла. В качестве покрытия использовали лак ЭТП2, нанесенный на поверхность конструкционной стали Ст3. Внедрение индентора осуществляли перпендикулярно поверхности покрытия на глубину, превышающую толщину покрытия на 10 %. Наконечник индентора, пластически деформируя некий объем материала покрытия, способствует формированию кольцевой области вспучивания покрытия вокруг отпечатка. С увеличением глубины внедрения на границе соединения материалов может зародиться и начать развиваться трещина вследствие разрушения адгезионных связей преимущественно по механизму сдвига за счет вытеснения материала покрытия из-под индентора. Границу отслоения покрытия от основы фиксировали по результатам расчета податливости материала покрытия при проведении дополнительных испытаний по внедрению индентора Виккерса в область вблизи отпечатка. Обнаружено, что ближе некоторого расстояния от отпечатка наблюдается резкое уменьшение податливости покрытия за счет наличия зазора в этой области между покрытием и основой. Этот факт использовали в качестве признака для определения радиальной длины кольцевой зоны отслоения покрытия.

Полученные результаты применили для численного моделирования формирования зоны отслоения покрытия при индентировании. Моделирование проводили в квазистатической постановке в программной среде ANSYS на супервычислителе кластерного типа URAN в ИММ УрО РАН. Для задания адгезионного контакта использовали контактные элементы с особыми свойствами, определяемыми посредством CZM модели. Предполагается, что при взаимном сдвиге поверхностей возникает виртуальный тонкий упругий слой, обладающий касательной жесткостью. В этом случае CZM модель представляет собой билинейную диаграмму распределения касательных сил сцепления в виртуальном слое непосредственно перед фронтом трещины, движущейся при разрыве адгезионных связей по механизму сдвига. Площадь диаграммы по смыслу соответствует удельной предельной энергии адгезионного разрушения. Необходимыми данными, описывающими диаграмму CZM, являются: максимальное касательное напряжение, которое может быть достигнуто на контакте без нарушения его целостности; значение упругой касательной жесткости, характеризующей способность виртуального слоя к восприятию упругих деформаций; величина критического раскрытия взаимодействующих поверхностей, соответствующая локальному разрыву адгезионных связей. Варьируя значения этих параметров, можно изменять форму диаграммы, т. е. управлять величиной локальной энергии разрушения, определяющей радиальную длину отслоившейся области покрытия при одной и той же глубине внедрения индентора. Исходя из этого, для идентификации модели решали серию задач по моделированию зоны отслоения покрытия при разных сочетаниях вышеперечисленных параметров модели CZM. В расчетах применили допущение о том, что максимальная величина касательного напряжения в виртуальном слое не превышает максимального значения сдвиговой прочности наименее прочной составляющей соединения – лака ЭТП2. Сравнение расчетных данных с результатами экспе-

римента осуществляли по величине квадратичной невязки значений радиальной длины зоны отслоения покрытия. Получена поверхность распределения значений невязки и определена предельная удельная поверхностная энергия локального адгезионного разрушения покрытия при параметрах CZM, обеспечивающих минимальное значение невязки.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФ № 19-19-00571 в части идентификации вычислительной модели применительно к покрытию ЭП2 и в рамках выполнения госзадания ИМАШ УрО РАН в части разработки методики определения адгезионной прочности.

DEVELOPMENT OF HIGH-PERFORMANCE LOW-TEMPERATURE PLASMA GENERATORS FOR VARIOUS PROCESSES

Sazonov M. I., Khvisevich V. M.^{a)}, Verameichyk A. I.^{b)},
Zheltkovich A. E., and Batrak V. V.

Brest State Technical University, 267 Moskovskaya St., Brest, 224017, Belarus
e-mail: ^{a)}vmhvisevitch@bstu.by; ^{b)}vai_mrtm@bstu.by

Low-temperature plasma generators (plasmotrons) are increasingly used in various technological processes. The introduction of highly concentrated heating sources (laser and electron beams, plasma jet) allows one to save material and labor resources. Research and practice of industrial applications have shown that a plasma heating source is not only effectively used along with laser and electron beam sources, but also more economically justified in some processes.

In many energy-saving technological processes, plasmotrons are widely used, in which the flow of various gases is heated to a temperature of 10000 K; for such processes, highly efficient plasmotrons are required. Their creation requires the solution of two main tasks: achieving an electric efficiency close to unit and implementing the highest thermal efficiency.

Equilibrium plasma with a temperature ranging from 4000 to 20000 K is used in various practical applications, namely for industrial production of various chemicals that are difficult or impossible to obtain, in welding, cutting and hardening of metals, for the application of wear-resistant thin films on machine parts (by plasma spraying), in electronics, metallurgy, and in many other processes. One of the industrial methods of obtaining plasma is the use of direct-current (DC) plasma generators, in which an electric arc burns in the flow of the working gas.

In order to determine the initial data for the calculation and development of plasma torches, local and integral volt-ampere characteristics of the arc burning in the flow of various gases have been studied. Based on the theory of similarity, a method for the calculation of plasmotrons is developed. The generalized dependence of the electric field E on the determining criteria (the flow rate of argon G , the diameter of the flash chamber d , the current I) during arcing in argon is presented as follows:

$$E = 4.2 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{G}{d} \right)^{0.11} \left(135 + 10^{-2} \frac{I}{d} \right) \cdot \left(0.9 + 1.6 \cdot 10^{-4} \frac{z}{d} \right) \quad (1)$$

The studies have allowed us to calculate, design and create a plasma torch, which is recommended for various studies and industrial use.

This design of the plasma torch was developed in order to achieve a high service life and highly efficient conversion of electrical energy into heat, as well as to match the current-voltage characteristics of the arc with commercially available special power sources of power supply of plasma torches.

The energy characteristics of the plasmatron are studied. Simultaneously with the study of the current-voltage characteristics of the arc, the heat flow into the elements of the plasma torch, i.e. cathode, anode and igniting electrode, has been measured. This makes it possible to calculate the thermal efficiency of the plasma torch, the enthalpy and the average mass temperature of the gas T depending on the arc current and the anode length at different gas flows. It has been found that, when using argon as a working gas, the thermal efficiency is equal to 0.68–0.74, and the calculated gas temperature at the output of the plasma torch is equal to $T = 3700$ – 7200 K.

The developed plasma torch is recommended to be used for various technological processes (e.g. shell hardening, surface hardening by plasma). The obtained data allow designing plasma torches with a power of up to 1 MW according to specified technical conditions in accordance with the requirements of the developed technological process.

УВЕЛИЧЕНИЕ КАСАТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ ДИАГРАММ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СЛОИСТЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ

Северов П. Б.

*ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук,
д. 4, Малый Харитоньевский пер., г. Москва, 101000, Российская Федерация
e-mail: alpinprom@yandex.ru*

В докладе с позиций методологии неупругого деформирования и разрушения твердых тел и сред в процессе их эволюции, развиваемой в институте физики прочности и материаловедения СО РАН (г. Томск), рассмотрены результаты экспериментальных исследований накопления повреждений в образцах из конструкционных слоистых углепластиков с целью объяснения характера зависимости напряжения от деформации при одноосном растяжении и, в частности, непривычного увеличения касательного модуля указанной зависимости. В работе Р.А. Lagace отмечено упругое нелинейное деформирование графитоэпоксидных образцов (углы укладки от 0° до $\pm 15^\circ$) с увеличением касательного модуля в момент разрушения на 11–13 % по отношению к модулю в начальной стадии нагружения, но при этом определенный физический механизм такого изменения модуля не приводится. Увеличение касательного модуля на 10% для однонаправленных композитов, нагруженных вдоль волокон, отмечено также в работе G.P. Sendeckuj, автор указывает на влияние модуля волокна (его увеличения) на характер зависимости «напряжение–деформация» для отдельного однонаправленного слоя. При квазистатическом растяжении образцов из конструкционных углепластиков с укладкой слоев 0° , $\pm 45^\circ$ суммарный эффект изменения касательного модуля, как указывает Р.А. Lagace, будет зависеть от соотношения количества слоев с указанными углами укладки: слои $\pm 45^\circ$ уменьшают касательный модуль вследствие сдвига материала в плоскости x – y под воздействием касательных напряжений, слои 0° его увеличивают.

В ИМАШ РАН (Москва) при квазистатическом одноосном растяжении образцов из материала КМУ-3Л (укладка 26 слоев 0° , 8 слоев $\pm 45^\circ$) получили увеличение касательного модуля примерно на 10 %. Разрушение образцов происходило вне зоны экстензометра. Впоследствии были проведены эксперименты на других слоистых квазиизотропных и однонаправленных углепластиках с применением метода акустической эмиссии для анализа накопления повреждений в процессе нагружения. Выяснилось, что незначительные выпуклость или вогнутость кривой деформирования зависят от взаимного расположения зоны деструкции, мигрирующей и развивающейся при растяжении образца, и места закрепления экстензометра на образце: при интенсивном развитии деформаций и разрушений в материале в зоне экстензометра касательный модуль уменьшается, в противном случае – увеличивается.

Таким образом, нелинейность диаграмм деформирования углепластиков с различными укладками определяется взаимным расположением экстензометра и зоны максимальной деформационной активности/разрушения в процессе записи диаграммы.

ПОВЕРХНОСТНЫЙ ЭФФЕКТ АКУСТИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ МЕТАЛЛОВ

Третьяков Д. А.¹, Беляев А. К.^{1,2}, Полянский В. А.^{1,2}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
д. 29, ул. Политехническая, г. Санкт-Петербург, 195251, Российская Федерация

²Институт проблем машиноведения РАН,
д. 61, пр. В.О. Большой, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация
e-mail: dmitry.tretyakov93@yandex.ru; vice.ipme@gmail.com; vapol@mail.ru

Работа посвящена исследованию неупругих деформаций и микроповреждений, накопленных в процессе изготовления и эксплуатации металлических конструкций путем ультразвукового неразрушающего контроля величины фазового сдвига между скоростями объемных поперечных волн взаимно ортогональной поляризации – акустической анизотропии. Методы, основанные на измерении акустической анизотропии, применяются в случае упругих деформаций конструкций для оценки осредненных по толщине механических напряжений.

Работа состоит из двух частей. В первой части представлены результаты исследования распределений акустической анизотропии при ступенчатом жестком одноосном растяжении корсетных алюминиевых образцов из промышленного проката вплоть до больших пластических деформаций и разрушения. Было показано, что в процессе неупругого деформирования металла наблюдается влияние сразу двух различных факторов на величину акустической анизотропии, связанных с пластическими деформациями.

Первый фактор связан с макроскопическими деформациями металла. Он проявляется в виде немонотонной зависимости акустической анизотропии от деформаций, в которой можно выделить три характерных участка. На первом участке наблюдается линейная зависимость акустической анизотропии от деформаций, являющаяся проявлением акустоупругого эффекта в металлах. Второй и третий участки кривой разделены двумя диапазонами деформаций, на которых наблюдается нарушение монотонного характера зависимости акустической анизотропии. Первый диапазон соответствует окончанию зоны чисто упругих деформаций, второй – деформациям образца вблизи предела временного сопротивления на кривой деформирования. Данный трехстадийный характер зависимости акустической анизотропии от деформаций наблюдался во всех точках вдоль рабочей части корсетных образцов с различной геометрией и не зависел от того, был ли вырезан образец вдоль или поперек направления проката. Вклад макроскопических деформаций в величину акустической анизотропии оставался одинаковым при заданной величине перемещений зажимов испытательной машины на каждом этапе ступенчатого нагружения вплоть до достижения предела временного сопротивления и образования шейки в образцах.

Второй фактор, влияющий на величину акустической анизотропии, связан с локализацией пластических деформаций и микроповреждений в поверхностном слое металла. Он вносит дополнительный вклад в величину акустической анизотропии, не одинаковый в различных точках образцов и сопоставимый с влиянием макродеформаций на акустическую анизотропию. Нелинейный характер изменения акустической анизотропии, вызванного влиянием пластических деформаций в поверхностном слое металла, проявляется при измерениях вдоль оси деформирования. В точках, расположенных перпендикулярно оси деформирования, аналогичных изменений акустической анизотропии не наблюдается.

Во второй части работы было показано, что влияние на акустическую анизотропию пластических деформаций и микроповреждений, локализованных в поверхностном слое металла, является поверхностным эффектом. Было обнаружено, что наблюдается кратное изменение величины акустической анизотропии при удалении 250–300 микрон поверхностного слоя алюминиевых образцов толщиной 20 мм после механических испытаний. Данный эффект быстро затухает при удалении слоя сверх определенной толщины, которая коррелирует со средним размером зерна металла.

Обнаруженный поверхностный эффект акустической анизотропии можно считать диагностическим признаком при техническом контроле. Он может быть использован для разработки методики оценки поврежденности поверхностного слоя конструкций, для которых удаление 200–300 микрон поверхностного слоя не будет оказывать влияния на несущую способность. Оценка макродеформаций конструкций также становится возможной при ослаблении поверхностного эффекта путем удаления тонкого слоя металла в области измерения акустической анизотропии.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, гранты 17-08-00783, 18-31-00329 и 18-08-00201.

МЕТОДЫ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ЗАДАЧЕ УПРАВЛЕНИЯ ИНСТРУМЕНТОМ ПРИ ЛИСТОВОЙ РЕЗКЕ НА МАШИНАХ С ЧПУ

Ченцов А. Г.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского Уральского отделения Российской академии наук,
д. 16, ул. Софьи Ковалевской, г. Екатеринбург, 620108, Российская Федерация*

Рассматривается общий подход к решению маршрутных задач, имеющих своим прототипом известную труднорешаемую задачу коммивояжера или TSP (в англоязычной литературе), но существенно отличающихся (в том числе качественно) за счет учета разнообразных ограничений и усложнения функций стоимости (имеются в виду функции, допускающие зависимость от списка заданий). В качестве основного метода решения используется нетрадиционный вариант динамического программирования (ДП), позволяющий на качественном уровне оптимизировать очередность выполнения заданий, конкретную траекторию перемещения в пространстве параметров и начальное состояние (точку старта). В числе рассматриваемых ограничений допускаются условия предшествования, а также технологические условия, типичные для задач, связанных с листовой резкой на машинах с ЧПУ. Особо отметим динамические ограничения, возникающие при выполнении заданий и зависящие от их очередности. Используется математическая модель мегаполисов в качестве объектов посещения с целью выполнения заданий, а формализация решений предполагает естественную иерархию: конкретный выбор траектории подчинен маршруту, определяемому в виде перестановки индексов заданий.

Трудности вычислительной реализации, присущие TSP, сохраняются и, более того, усугубляются в рассматриваемых задачах маршрутизации (в «положительном направлении» удается, однако, использовать условия предшествования, что позволяет реализовать экономичный вариант ДП). В этой связи при построении решения используются алгоритмы с элементами распараллеливания, а также процедуры локального улучшения эвристик на основе оптимизирующих вставок и мультывставок, конструируемых с применением аппарата ДП.

Основные этапы исследования

Построение математической модели

Исходная содержательная задача сводится к постановке, в которой требуется при соблюдении ограничений (в том числе условий предшествования) осуществить последовательное посещение непустых конечных множеств – мегаполисов. Каждое посещение сопровождается выполнением работ, именуемых внутренними. Сами мегаполисы могут быть заданы изначально, либо получаться при дискретизации «непрерывных» множеств. Так, в задачах, связанных с листовой резкой, мегаполисы могут создаваться при дискретизации контуров деталей (точнее, их эквидистант). Формируются функции стоимости перемещений, внутренних работ и терминального состояния. Упомянутые функции могут содержать зависимость от списка заданий; такая зависимость может создаваться искусственно с целью реализации системы штрафов за несоблюдение ограничений динамического характера (пример, Ченцов А.Г., Ченцов П.А. Автоматика и телемеханика, 2016, № 11). Функция терминального состояния может, в частности, оценивать перемещение в точку старта, если таковое требуется по условиям исходной задачи.

Формализация и постановка задачи

Последовательно вводятся маршруты (перестановки индексов) и пучки траекторий, подчиненные выбранным маршрутам. При наличии условий предшествования среди всевозможных маршрутов выделяются допустимые (по предшествованию). Определяется аддитивный критерий, получаемый посредством суммирования функций стоимости вдоль

траекторий процесса. Формируется (аддитивная) задача маршрутизации как оптимизационная задача на пространстве допустимых решений, определяемых каждое в виде пары маршрут – трасса.

Динамическое программирование, вывод уравнения Беллмана

На данном этапе существенным является построение расширения исходной задачи, реализуемого в виде системы частичных (укороченных) задач. Устанавливается, что допустимость по предшествованию в основной задаче эквивалентна допустимости по вычеркиванию (заданий из списка), после чего в частичных задачах используются условия, связанные с допустимостью по вычеркиванию, что отвечает содержательно замене системы условий (предшествования) на маршрут в целом комплексом условий на текущие перемещения. В этих терминах устанавливается ключевое соотношение – уравнение Беллмана.

Экономичный вариант динамического программирования

Конструируется пошаговая процедура построения слоев функции Беллмана. Сначала вводятся существенные в смысле условий предшествования для данного построения списки заданий, затем – слои пространства позиций. Слои функций Беллмана определяются как сужение данной функции на упомянутые слои пространства позиций. На основании уравнения Беллмана определяется система преобразований частичных функций, которая применяется для пошагового построения слоев. В результате поэтапно определяются глобальный экстремум и оптимальные решения, включая оптимизацию точки старта. На наиболее трудоемком этапе построения слоев функции Беллмана возможно распараллеливание процедуры с использованием схемы независимых вычислений (Ченцов А.Г. Автоматика и телемеханика, 2012, № 3).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МАГИСТРАЛЬНОМ ГАЗОПРОВОДЕ

Шардаков И. Н., Цветков Р. В., Шестаков А. П., Глот И. О.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН,
д. 1, ул. Академика Королева, Пермь, 614013, Российская Федерация
e-mail: shardakov@icmm.ru*

Магистральные газопроводы являются ответственными инженерными сооружениями, обеспечение безопасной эксплуатации которых представляет актуальную научно-техническую проблему. Одним из важных аспектов решения этой проблемы является разработка и создание автоматической системы мониторинга, контролирующей деформационные динамические процессы, происходящие в элементах системы *трубопровод–газ–грунт*. Именно динамические колебательные и волновые явления, возникающие в процессе эксплуатации газопровода, содержат много полезной информации о деформационном взаимодействии элементов газопровода, о частотных и энергетических параметрах распространяющихся по газопроводу возмущений, а также о причинах, спровоцировавших тот или иной режим волнового колебательного процесса. Математические модели, которые используются при разработке и эксплуатации систем мониторинга, могут быть эффективными и полезными, если они прошли надежную верификацию, опирающуюся на экспериментальные результаты.

В рамках работы выполнен цикл экспериментальных исследований вибрационных процессов на участке действующего магистрального газопровода. Параметры газопровода: диаметр трубы – 1400 мм; длина участка – 2800 м; глубина залегания трубы в грунт – от 2 до 3 м; рабочее давление в трубе – от 60 до 75 кг/см².

Цель проведенных исследований – анализ волновых колебательных процессов трубы газопровода, возникающих в результате различных внешних воздействий. В качестве таких воздействий рассматриваются удары по поверхности грунта в окрестности трубопровода; работа запорной арматуры (переход запорной арматуры из состояния «открыто» в состояние «закрыто» и наоборот); сброс газа из газопровода через отверстия различного диаметра, имитирующие появление свища в стенке трубопровода.

Для регистрации вибрационных процессов на поверхности трубопровода был использован измерительный комплекс, в состав которого входила система однокомпонентных акселерометров на основе волоконно-оптических датчиков с брэгговскими решетками, а также система сбора, регистрации и первичной обработки данных. Для регистрации распространения вибрационных процессов по поверхности земли использовались трехкомпонентные сейсмодатчики. Для обработки результатов виброизмерений применялся математический аппарат фурье- и вейвлет-анализа.

Заключение

1. На основе полученных результатов установлена экспериментальная зависимость уровня вибрационного воздействия на трубопровод от расстояния и энергии ударного воздействия по грунту в окрестности трубопровода.

2. Обнаружено, что при различных режимах работы запорной арматуры возбуждаются низкочастотные колебания давления в газе, которые надежно фиксируются волоконно-оптическими акселерометрами на поверхности трубопровода на расстоянии более 2 км от места возмущения.

3. Показано, что появление утечек в газопроводе приводит к возникновению высокочастотных колебаний в диапазоне 0,8–8 кГц, уровень которых зависит от величины отверстия. Эффективная регистрация этих колебаний может быть осуществлена путем измерения колебаний давления газа внутри трубы.

4. Полученные результаты и закономерности могут быть использованы при разработке и создании автоматических систем мониторинга деформационного состояния газопроводов.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРАЦИИ СТУПЕНЕЙ ЭЦН НА ЛАБОРАТОРНОМ ИСПЫТАТЕЛЬНОМ СТЕНДЕ

Петрухин В. В.¹, Петрухин С. В.²

¹Тюменский индустриальный университет,
д. 38, ул. Володарского, Тюмень, 625000, Российская Федерация
e-mail: morris58@mail.ru

²АО Инженерно-производственная фирма «Сибнефтеавтоматика»,
д. 8, ул. Новаторов, Тюмень, 625014, Российская Федерация
e-mail: spetruhin_85@mail.ru

В настоящее время более 90 % нефти в Западной Сибири нефтяные компании добывают с помощью УЭЦН. Этот способ применяется на 2/3 скважин эксплуатационного фонда.

Процесс добычи сопряжен с большим количеством осложняющих факторов, влияющих на работу УЭЦН. В связи с этим одной из основных задач, стоящих перед нефтяной компанией, является снижение степени влияния этих факторов, что позволит снизить затраты и повысить эффективность производства.

Вследствие постоянной оптимизации нефтедобычи погружное оборудование часто эксплуатируется в жестких условиях (солеотложения, высокий уровень вибрации, большие скорости коррозии), что приводит к быстрому износу узлов оборудования и преждевременным отказам.

Ввиду перечисленных обстоятельств потребительский уровень оборудования массового выпуска постоянно совершенствуется за счет модернизации отдельных узлов, снижения величины вибрации и формирования специальных комплектаций из серийных комплектующих, в том числе выпускаемых различными производителями.

Предприятия, занимающиеся разработкой и выпуском комплектующих для специальных деталей в осложненных условиях работы, используют различные методы для снижения вибрации – подбор комплектующих деталей и узлов основных производителей, снижение массы вращающихся деталей, улучшение качества поверхностей деталей и проточных каналов, применение деталей из полимеров, использование специальных «скользящих» покрытий. При массовом применении оборудования не исключены случаи, когда двигатель и часть насосных секций лежит на эксплуатационной колонне в искривленной части скважины, что может провоцировать ударную вибрацию и повышенную вибрацию от касания с колонной.

В конце 1980-х – начале 1990-х гг. сотрудниками кафедры «Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов» Тюменского индустриального института совместно со специалистами НЦБПО НПО г. Нефтеюганска рассматривались вопросы создания стендового оборудования для обкатки и испытания погружного оборудования ЭЦН и его технического диагностирования в связи с появлением новых отказов погружного оборудования – «полетов». Результатом этой работы стало создание стенда для динамических испытаний погружных центробежных электронасосов.

Экспериментальные исследования работы ступеней погружных центробежных электронасосов (ЭЦН) на воде осуществлялись на специальном испытательном стенде – лабораторной модификации вышеупомянутого стенда [1].

Эксперимент по исследованию вибрации насосного агрегата проводился в несколько этапов, каждый из которых представлял законченную составную часть исследований с целью, задачами и методикой проведения.

В связи с увеличением количества аварий типа «полет» у агрегатов модульного исполнения (ЭЦНМ) в ходе эксперимента была сделана попытка выяснить, какой узел насосного агрегата вносит наибольшую долю вибрации при работе всего оборудования в сборе.

В соответствии с этим цель эксперимента – исследование вибрации составных частей насосного агрегата для определения влияния качества сборки и его отдельных составных частей на общую величину вибрации агрегата, оценка доли каждой составной части в общей картине вибрации насосного агрегата.

Первый этап – испытание электродвигателя на холостом ходу в вертикальном положении.

Второй этап – испытание электродвигателя, работающего совместно со входным модулем насоса.

Третий этап – испытание сборки «электродвигатель–входной модуль–шлицевая муфта насоса».

Четвертый этап – испытание насосного агрегата на воздухе.

Измерение виброхарактеристики входного модуля на воздухе показало, что радиальное виброускорение сборки увеличивается на 23 %, а осевое более чем в два раза (106 %).

Исследования, проводимые позднее на этом же оборудовании, имели целью отработку методики измерений с помощью цифровой аппаратуры нового поколения и подтверждение результатов исследования на измерительной технике, в настоящее время считающейся морально устаревшей.

Исследования проводились в соответствии с программой эксперимента 1999 г. в той же последовательности.

Результат исследований – вибрационные характеристики насосного агрегата для всех этапов эксперимента.

Результаты исследований подтвердили полученные ранее общие закономерности [2].

Спектральный состав в большой степени зависит от включенного в сборку оборудования, отдельные гармоники сглаживаются или пропадают при изменении состава сборки.

Исследования показали, что главным источником повышенной вибрации модульного насосного агрегата является конструкция входного модуля, наличие которого вызывает увеличение радиальной вибрации сборки на 23 %, а осевой вибрации – на 106 %. Таким образом осевая вибрация по сравнению с радиальной от входного модуля увеличивается в 2,8 раза.

Изменение подачи и напора для серийных ступеней ЭЦН-80 показало, что радиальная и осевая вибрации незначительно зависят от подачи и напора, создаваемого насосом: изменение радиальной вибрации находится в пределах 10 % и осевой – 20 %, наблюдаемой только в области оптимальной подачи.

Сокращение числа обрывов погружного оборудования связано с уменьшением осевой вибрации во входном модуле, вызывающей усталостное разрушение материала насосных агрегатов. Таким образом решением проблемы является создание виброгасящих модулей или переноса входного модуля в корпус гидрозащиты электродвигателя.

Проведенные измерения виброхарактеристик системы для нового и изношенного насосов на любых режимах работы выявили следующие закономерности: характер колебаний не соответствовал линейности системы, так как периодическое воздействие не вызвало периодический отклик; в многочисленных экспериментах не наблюдались резонансные явления; квазипериодические сигналы прерывались случайными выбросами.

Существующая теория линейной зависимости величины вибрации от износа не объясняет результаты экспериментальных исследований.

Литература

1. Петрухин В. В. Исследование и разработка мероприятий по повышению эффективности эксплуатации погружных центробежных электронасосов для добычи нефти: дис. ... канд. техн. наук. – Тюмень, 2000. – 165 с.
2. Петрухин С. В. Исследование и разработка технических и технологических решений повышения производительности работы нефтяных скважин : дис. ... канд. техн. наук. – Уфа, 2013. – 150 с.

АНАЛИЗ ФОРМОИЗМЕНЕНИЙ ЭЛЕКТРОУПРУГИХ ТЕЛ ПРИ ПОДАЧЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА НА ЭЛЕМЕНТЫ ИЗ ПЬЕЗОМАТЕРИАЛОВ

Севодина Н. В., Юрлова Н. А., Ошмарин Д. А., Юрлов М. А.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН,
д. 1, Академика Королева, Пермь, 614013, Российская Федерация
e-mail: natsev@icmm.ru; yurlova@icmm.ru; oshmarin@icmm.ru; yurlov@m@icmm.ru*

Одно из направлений применения в технике смарт технологий на основе пьезоэлементов связано со встраиванием их в конструкции с целью изменения формы деформированного объекта на основе использования обратного пьезоэффекта.

Для реализации различных стратегий управления формоизменением конструкции необходимо оценить возможности пьезоэлемента влиять на ее деформации, т. е. обеспечить формоизменение. Это зависит как от пьезоэлемента (размеров, физико-механических характеристик материала, расположения пьезоэлемента на конструкции и др.), так и от конструкции (геометрии, толщины, граничных условий, физико-механических характеристик). Численное моделирование открывает возможности для понимания вкладов различных факторов на величину перемещений при деформировании конструкции с помощью пьезоэлемента, на электродированные поверхности которого подается управляющее электрическое напряжение.

В работе предлагается подход к компоновке конструкции пьезоэлементами (определение размеров, количества пьезоэлементов, их расположения на поверхности конструкции и по отношению друг к другу), обеспечивающего наибольший по величине механический отклик конструкции при подаче на пьезоэлементы управляющего электрического сигнала.

Для получения характеристик управляющего сигнала решается связанная задача электроупругости как в статической, так и в динамической (собственные колебания, вынужденные установившиеся колебания) постановках. Вариационные уравнения равновесия (при решении статических задач) и движения (при решении динамических задач) для кусочно-однородного тела, состоящего из упругих и пьезоэлектрических элементов, формулируются на основе соотношений линейной теории упругости и квазистатических уравнений Максвелла.

Рассматриваемая задача формулируется в вариационной постановке с использованием при численной реализации метода конечных элементов (МКЭ). Решение статических и динамических задач для электроупругих систем с внешними электрическими цепями осуществляется с помощью конечно-элементного пакета прикладных программ ANSYS и разработанного авторами проекта специального алгоритма, в котором для использования возможностей ANSYS написаны макросы на языке APDL и программы на языке FORTRAN. Для решения полученной алгебраической задачи комплексных собственных значений использован метод Мюллера с различными сценариями выбора начальных приближений.

Разработанные алгоритмы решения задач электроупругости позволяют оценить формоизменение электроупругого тела при подаче электрического потенциала на электродированные поверхности фрагментов, выполненных из пьезоматериалов. Возможности разработанного алгоритма проиллюстрированы на упругой изотропной прямоугольной консольно-защемленной пластине, выполненной из алюминия. К поверхности пластины присоединялись пьезоэлементы, выполненные либо из пьезокерамики ЦТС-19, либо из пьезополимера MFC (macro-fiber composite) Данные материалы выбраны как наиболее типичные в своих группах и нашедшие наибольшее распространение как в теоретических, так и в прикладных исследованиях.

В качестве иллюстрации возможностей численного моделирования исследованы различные факторы, влияющие на эффективность управления геометрией пластины при использовании обратного пьезоэффекта.

Показано, что при использовании нескольких пьезоэлементов, на часть из которых подаются положительные, а на другие элементы – отрицательные электрические потенциалы, можно получить различные изменения профиля конструкции. Кроме того, в качестве параметра при управлении геометрией могут быть использованы различные соотношения величин электрических потенциалов, подаваемых на пьезоэлементы.

Анализ полученных результатов позволил сделать вывод о том, что для тонких пластинок пьезополимер МФС позволяет достичь лучших показателей по сравнению с пьезокерамикой, но с возрастанием толщины конструкции использование пьезополимера МФС и пьезокерамики становится равноценным. При этом МФС вызывает большие перемещения свободного торца консольно-защемленной пластинки, чем пьезокерамика ЦТС-19 при увеличении прикладываемого к пьезоэлементу электрического потенциала.

Работа выполнялась при поддержке Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 19-41-590007_p-a).

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СВС-КОМПОЗИТОВ

Пугачева Н. Б.¹, Николин Ю. В.²

¹Институт машиноведения УрО РАН,

д. 34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Российская Федерация

²ООО «СОЛИД-ФЛЭЙМ»,

д. 54, кор. 5, к. 273, ул. Ленина, г. Екатеринбург, 620075, Российская Федерация

e-mail: nat@imach.uran.ru

Технологический процесс самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) твердых веществ и материалов известен уже практически полвека. В настоящее время работы по исследованию этого процесса ведутся почти в 47 странах мира. Этот процесс основан на проведении экзотермической химической реакции взаимодействия исходных реагентов в форме горения, где целевым продуктом горения являются твердые химические соединения (карбиды, нитриды, бориды, оксиды и т. п.) и материалы на их основе. Основными реагентами в СВС-процессах являются порошки металлов и неметаллов, а конечным продуктом – порошки или спеченные массивные материалы, покрытия.

Преимущества технологии СВС заключаются в отсутствии затрат электроэнергии для нагрева до высоких температур, (работает тепло, выделяемое реакцией горения), в использовании простого малогабаритного оборудования, реализации больших скоростей процесса. В настоящее время создано около 100 разновидностей технологии СВС, позволяющих синтезировать более тысячи веществ и материалов, наносить покрытия, сваривать детали. В России распространены технологии СВС шести типов: реакторная порошковая, спекания, силового компактирования, литья и наплавки, сварки, газотранспортных покрытий. Материалы и технологии СВС имеют самое широкое применение: в машиностроении (абразивные, лезвийные и штамповые инструменты, высокотемпературные и износостойкие детали), в металлургии (огнеупоры, наплавки, электроды, ферросплавы, металлопроводы), в электротехнике и электронике (ферриты, сегнетоэлектрики, изоляторы, нагревательные элементы, высокотемпературные сверхпроводники), в химической промышленности (катализаторы), в медицине (эндопротезы из сплавов с памятью формы). Процесс СВС является также весьма перспективным для получения наноматериалов: наноразмерных порошков, волокон и пленок, а также наноструктурных компактных материалов.

Авторами накоплен определенный опыт в создании СВС-компози́тов. Особое внимание уделяется исследованию явлений, происходящих при вторичном структурообразовании, которые в настоящее время мало изучены. Известные композиты такого класса отличаются высокой хрупкостью и склонностью к образованию трещин при внешнем нагружении, особенно в случае приложения ударных нагрузок, поэтому применяются, главным образом, в качестве режущих инструментов. Возрастающие эксплуатационные мощности машин и агрегатов выдвигают новые требования создания высокоизносостойких материалов с удовлетворительными показателями конструкционной прочности. С этой точки зрения перспективным направлением представляется разработка новых СВС-компози́тов с регулируемым содержанием наполнителя (упрочняющих фаз) и пластичной матрицей, в качестве которой могут быть использованы железо, никель и медь. Особое внимание уделяется выбору исходных порошков для получения СВС-компози́тов. Установлено, что размер и форма частиц оказывают существенное влияние на процесс синтеза.

В частности, при СВС исходных порошков Fe, Ni, Ti, C, В₄C, засыпанных в полость стальной трубы и нагретых в печи до 1200 °С, формируется единая монолитная «сэндвич-пластина», состоящая из наружной стальной оболочки, диффузионно связанной с образовавшимся композитом. Матрицей СВС-компози́та является твердый раствор никеля и титана в ГЦК-решетке железа. Упрочняющие фазы – частицы TiC, TiB₂ и Fe₂B размерами от 1 до 4 мкм. Параметры технологического режима синтеза позволяют регулировать пористость и характер распределения частиц упрочняющих фаз. После завершения синтеза компози́та проводят горячее компактирование заготовок в гидравлическом прессе при 1200 °С с нагрузкой

не менее 250 МПа с целью удаления пор. Полученный беспористый композит имеет твердость 58–62 HRC и износостойкость на уровне известной шведской износостойкой стали Hardox 550, которая является мировым лидером среди износостойких материалов. На границе между композитом и внутренней поверхностью стальной оболочки формируется диффузионная переходная зона с плавным изменением концентрации железа, никеля и титана, а также значений микротвердости. Диффузионное взаимодействие внешней оболочки с продуктами СВС обеспечивает формирование единой многослойной конструкции – «сэндвич-пластины». Стальная оболочка имеет особое назначение – она обеспечивает хорошую свариваемость заготовки с другими элементами конструкций, которые надо защитить от воздействия износа абразивными частицами.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме АААА-А18-118020790145-0.

ОДНОНАПРАВЛЕННЫЕ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНЫЕ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ С ГРАНИЧНЫМ УСЛОВИЕМ НАВЬЕ

Бурмашева Н. В.^{1,2}, Просвиряков Е. Ю.^{1,2}

¹*Институт машиноведения УрО РАН,*

д. 34, ул. Комсомольская, Екатеринбург, Российская Федерация,

²*Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,*

д. 19, ул. Мира, Екатеринбург, Российская Федерация,

e-mail: nat_burm@mail.ru; evgen_pros@mail.ru

Одной из основных задач в гидродинамике является вопрос о том, каким образом меняются скорость, температура и другие поля при движении жидкости. Для ответа на этот вопрос необходимо найти решение уравнения Навье–Стокса, являющегося уравнением движения вязкой жидкости, уравнения теплопроводности, описывающего изменение температурного поля, и других базовых уравнений, входящих в определяющую модель вязкой жидкости систему. Известно, что решения систем уравнений в частных производных сильно зависят от краевых условий.

В докладе рассматривается течение в плоском горизонтальном слое. Построенное точное решение описывает влияние эффекта Марангони и условия проскальзывания Навье на распределение гидродинамических полей. Рассмотрены различные случаи относительно величины длины скольжения, в том числе и классическое условие прилипания на твердой границе слоя.

Наиболее подробно проанализировано поле скорости течения. В поставленной краевой задаче скорость определяется полиномом высокой степени, что значительно усложняет анализ свойств решения. Применение математического аппарата локализации корней многочленов позволило сделать вывод о том, что полученный полином может иметь корни внутри рассматриваемого слоя, т.е. показана принципиальная возможность расслоения поля скорости на несколько зон.

ОДНОНАПРАВЛЕННЫЕ ТЕЧЕНИЯ МАРАНГОНИ–ПУАЗЕЙЛЯ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ С ГРАНИЧНЫМ УСЛОВИЕМ НАВЬЕ

Бурмашева Н. В.^{1,2}, Просвиряков Е. Ю.^{1,2}

¹Институт машиноведения УрО РАН,

д. 34, ул. Комсомольская, Екатеринбург, Российская Федерация,

²Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,

д. 19, ул. Мира, Екатеринбург, Российская Федерация,

e-mail: nat_burm@mail.ru; evgen_pros@mail.ru

Движение вязкой ньютоновской жидкости описывается уравнениями Навье–Стокса. Нахождение точных решений этих уравнений в настоящее время вызывает интерес в связи с моделированием конвективных процессов в жидкости. Конвективные процессы, вызванные линейным распределением температуры на границе, впервые были описаны Остроумовым и Бирихом. Более общий класс решений – класс решений, линейных по части горизонтальных координат, – предложил Линь, правда, применительно к задачам магнитной гидродинамики. Позднее этот класс был адаптирован для задач конвекции и термодиффузии. Помимо задачи построения класса отдельную проблему представляет выбор граничных условий, поскольку известно, что решение уравнений в частных производных сильно зависит от этих условий. Традиционно при исследовании течений жидкости вдоль твердой поверхности используется условие прилипания. Но эксперименты показывают, что оно часто нарушается.

В докладе рассматривается новое точное решение переопределенной системы уравнений тепловой конвекции, которое описывает установившееся сдвиговое течение вязкой несжимаемой жидкости в бесконечном слое при учете условия проскальзывания Навье и термокапиллярного эффекта на нижней и верхней границах слоя соответственно. Отличительной особенностью полученного решения является учет неоднородного распределения поля давления на верхней границе рассматриваемого слоя жидкости. В предложенном решении скорость течения зависит только от вертикальной (поперечной) координаты. При этом поля давления и температуры являются неоднородными.

Основное внимание в докладе уделено исследованию поля скорости, описываемого многочленами высоких порядков. Обсуждаются особенности профиля скорости в зависимости от величины длины скольжения. При помощи использованных при анализе алгебраических методов показано, что поле скорости может расслаиваться относительно отсчетного значения. Приведены примеры ситуаций, иллюстрирующих стратификацию поля скорости.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 19-19-00571).

ОДНОНАПРАВЛЕННЫЕ КОНВЕКТИВНЫЕ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ С ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЕМ В ЗАМКНУТОМ СЛОЕ

Бурмашева Н. В.^{1,2}, Ларина Е. А.², Просвиряков Е. Ю.^{1,2}

¹Институт машиноведения УрО РАН,

д. 34, ул. Комсомольская, Екатеринбург, Российская Федерация,

²Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,

д. 19, ул. Мира, Екатеринбург, Российская Федерация,

e-mail: nat_burm@mail.ru; larinakaterina@hotmail.com; evgen_pros@mail.ru

Одной из самых часто используемых моделей, предназначенных для описания конвекции в вязких теплопроводящих жидкостях, является система уравнений тепловой конвекции в приближении Буссинеска. Как и у любой другой системы дифференциальных уравнений в частных производных ее решение сильно зависит от краевых условий.

В докладе представлено полученное с помощью семейств обобщенных решений новое точное решение для установившегося однонаправленного течения вязкой несжимаемой жидкости в горизонтальном слое, на твердой границе которого выполняется условие проскальзывания Навье. Отметим, что традиционно используемое условие прилипания на твердой границе следует из условия проскальзывания Навье, если положить длину скольжения равной нулю. Отличительной особенностью построенного решения является учет нулевого расхода жидкости (фактически речь идет о течении в замкнутом слое) при неоднородном распределении давления на свободной поверхности.

Доклад посвящен анализу зависимости свойств поля скорости течения от величины длины скольжения. Показана принципиальная возможность стратификации поля скорости. В частности, показано, что поле скорости допускает стратификацию даже в случае термоизолированных границ, причем независимо от величины продольного градиента давления и величины длины скольжения. Приведены соответствующие примеры.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 19-19-00571).

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Batrak V. V. 52
Kalentiev E. A. 11
Khvisevich V. M. 52
Lokhanina S. Yu. 11
Sazonov M. I. 52
Tarasov V. V. 11
Verameichyk A. I. 52
Zamaraev L. M. 38
Zheltkovich A. E. 52
Антонова И. А. 7
Ашкинази Е. Е. 7
Бабайлов Н. А. 33
Беляев А. Б., 32
Беляев А. К. 54
Березин И. М. 3
Бобков В. И. 15, 34
Богачев А. Е. 33
Богданова Н. А. 6
Бочкарева С. А. 43
Бурмашева Н. В. 65, 66, 67
Буслович Д. Г. 43
Бывальцев С. В. 8
Быкова Т. М. 45
Веретенникова И. А. 49
Глот И. О. 58
Гузанов Б. Н. 45
Дементьев В. Б. 36
Денисенко Д. В. 10
Денисов А. Н. 15
Дли М. И. 15, 34
Донцов Ю. В. 43
Емельянов И. Г. 37
Жилин С. Г. 5, 6
Жихарева И. Г. 10
Закирьянов Е. А. 17
Залазинский А. Г. 8
Засыпкин А. Д. 36
Игумнов А. С. 50
Казаков А. Л. 28
Каменецких А. С. 39
Каплунов И. А. 30
Каракозов Е. В. 42
Козлов П. В. 40
Комаров О. Н. 5, 6
Конов В. И. 7
Коновалов Д. А. 50
Корниенко Л. А. 43
Кулак С. М., 12, 17, 20
Курилин С. П. 15
Ларина Е. А. 67
Миронов В. И. 37, 40
Митрофанов Д. Д. 12
Мичуров Н. С. 44, 45
Морозов И. А. 39
Москвина Е. Ю. 41
Муратов К. Р., 17, 20
Мушников А. Н. 27
Мясникова М. В. 50
Нефедова О. А. 33
Николин Ю. В. 63
Новиков В. Ф., 12, 17, 20
Обабков Н. В. 45
Овечкин П. В., 17
Огорелков Д. А. 40
Одинцев И. Н. 42
Ошмарин Д. А. 47, 61
Панин С. В. 43
Пермяков В. Н. 22
Пестов А. В. 49, 50
Петрухин В. В. 59
Петрухин С. В. 59
Плотников А. С. 42
Поляков А. П. 44
Поляков П. А. 44
Полянский В. А. 54
Попов А. В. 5
Попова С. А., 17
Попович А. Ф. 7
Предеин В. В. 5
Привалова В. В. 24, 25
Просвирыков Е. Ю. 24, 25, 65, 66, 67
Пугачева Н. Б. 45, 63
Ральченко В. Г. 7
Рогалин В. Е. 7, 30
Северов П. Б. 53
Севодина Н. В. 47, 61
Смирнов С. В. 49, 50
Смирнова Е. О. 49, 50
Соловей В. Д. 27
Соснин А. А., 6
Спевак Л. Ф. 28, 33
Сызранцева К. В. 41
Третьяков Д. А. 54
Филин С. А. 30
Хайруллина Л. Б. 22
Хакимов А. Г. 32
Хомич А. А. 7
Цветков Р. В. 58

Ченцов А. Г. 56
Шардаков И. Н. 58
Швейкин В. П. 8
Шестаков А. П. 58
Шмидт В. В. 10
Юрлов М. А. 47, 61
Юрлова Н. А. 47, 61
Юров В. Ю. 7
Якименко И. В. 34
Яковлев В. В. 40

СОДЕРЖАНИЕ

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАВНОКАНАЛЬНОГО-УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ ПОРОШКОВОЙ ЗАГОТОВКИ С ПОДПОРОМ ПЛАСТИЧЕСКИ-ДЕФОРМИРУЕМОЙ СРЕДОЙ Березин И. М., Быкова Т. М.	3
ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУР АЛЮМОТЕРМИТНЫХ ЛИТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИХ ПОЛУЧЕНИЯ Попов А. В., Комаров О. Н., Жилин С. Г., Предеин В. В.	5
МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРЕССОВОК ИЗ ВОСКООБРАЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ Соснин А. А., Богданова Н. А., Жилин С. Г., Комаров О. Н.	6
НЕРАЗРУШАЮЩАЯ ДИАГНОСТИКА АЛМАЗНЫХ ПОКРЫТИЙ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ РЕЗЦОВ Ашкинази Е. Е., Хомич А. А., Попович А. Ф., Юров В. Ю., Рогалин В. Е., Антонова И. А., Ральченко В. Г., Конов В. И.	7
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССА ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ Бывальцев С. В., Залазинский А. Г., Швейкин В. П.	8
РАЗРАБОТКА КОРРОЗИОННОЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ НАНОСТРУКТУРНЫМ СПЛАВОМ FE-NI, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ РАБОТЫ В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ Жихарева И. Г., Денисенко Д. В., Шмидт В. В.	10
PREDICTION OF WEIGHT ABRASIVE WEAR RATE BY MACHINE LEARNING METHODS Kalentiev E. A., Tarasov V. V., and Lokhanina S. Yu.	11
МАГНИТОУПРУГОЕ РАЗМАГНИЧИВАНИЕ СЛОЖНОАГРУЖЕННОЙ КОНСТРУКЦИИ Кулак С. М., Новиков В. Ф., Митрофанов Д. Д.	12
МЕТОД ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ Курилин С. П., Денисов А. Н., Дли М. И., Бобков В. И.	15
ВЛИЯНИЕ ЖЕСТКОСТИ СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ НА ОЦЕНКУ СИЛЫ ИХ НАТЯЖЕНИЯ ПО ЧАСТОТЕ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ Муратов К. Р., Новиков В. Ф., Кулак С. М., Попова С. А., Овечкин П. В., Закирьянов Е. А.	17
ВОЗМОЖНОСТИ МАГНИТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ И РЕСУРСА ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ Новиков В. Ф., Муратов К. Р., Кулак С. М.	20
ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ХРУПКИМИ ТЕНЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ Пермяков В. Н., Хайруллина Л. Б.	22
НЕОДНОРОДНОЕ ТЕЧЕНИЕ ТИПА КУЭТТА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ УСЛОВИЯ ИДЕАЛЬНОГО СКОЛЬЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ НА НИЖНЕЙ ГРАНИЦЕ БЕСКОНЕЧНОГО СЛОЯ Привалова В. В., Просвиряков Е. Ю.	24
ТОЧНОЕ РЕШЕНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕЧЕНИЯ СЛОЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ УСЛОВИИ НАГРЕВА НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ Привалова В. В., Просвиряков Е. Ю.	25
ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ НА УПРОЧНЕНИЕ МЕДИ Соловей В. Д., Мушников А. Н.	27
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕШЕНИЙ ТИПА БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ Казаков А. Л., Спевак Л. Ф.	28
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РАСТВОРИТЕЛЕЙ ДЛЯ ОЧИСТКИ МЕТАЛЛООПТИКИ С ЦЕЛЬЮ УВЕЛИЧЕНИЯ ЕЕ РЕСУРСА Филин С. А., Рогалин В. Е., Каплунов И. А.	30

К РАСЧЕТУ ТРУБЫ ИЗ НЕОДНОРОДНОГО УПРУГОГО МАТЕРИАЛА Беляев А. Б., Хакимов А. Г.	32
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РОГОВИЦЫ ГЛАЗА ЧЕЛОВЕКА НА ОСНОВЕ МЕТОДА ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ Бабайлов Н. А., Богачев А. Е., Нефедова О. А., Спевак Л. Ф.	33
ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ПРОЧНОСТИ ОКАТЫШЕЙ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ ОБЖИГЕ Бобков В. И., Дли М. И., Якименко И. В.	34
О ВЛИЯНИИ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ И ЕГО ШЕРОХОВАТОСТИ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ПОЛЫХ ВАЛОВ И ОСЕЙ ИЗ ГОРЯЧЕКАТАНОЙ ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКИ Дементьев В. Б., Засыпкин А. Д.	36
НАПЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТИТАНОВОЙ ОБОЛОЧКИ В АГРЕССИВНОЙ СРЕДЕ Емельянов И. Г., Миронов В. И.	37
A COMPARATIVE STUDY OF HIGH-TEMPERATURE CREEP IN VT-5-1 TITANIUM ALLOY SAMPLES UNDER STEPWISE HEATING TO 1323 K IN A HYDROGEN ENVIRONMENT AND IN AIR L. M. Zamaraev	38
ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ ДЕФОРМИРУЕМЫХ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ПОКРЫТИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ЭЛАСТИЧНЫХ ПОЛИМЕРОВ Морозов И. А., Каменецких А. С.	39
ВЛИЯНИЕ НАПОЛНИТЕЛЯ НА ДЕМПФИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА БАЛКИ Миронов В. И., Огорелков Д. А., Козлов П. В., Яковлев В. В.	40
СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНЫХ ТРУБ Москвина Е. Ю., Сызранцева К. В.	41
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСОКОГРАДИЕНТНЫХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ МЕТОДОМ СВЕРЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ Одинцев И. Н., Плотников А. С., Каракозов Е. В.	42
ИЗНОСОСТОЙКИЕ МНОГОКОМПОНЕНТНЫЕ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ МАТРИЦЫ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПЭ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ МЕТОДОМ FUSED DEPOSITION MODELING Панин С. В., Бочкарева С. А., Буслевич Д. Г., Корниенко Л. А., Донцов Ю. В.	43
ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРУЮЩИХ МИКРОДОБАВОК ZN, CU, S НА ПРОЦЕСС УПЛОТНЕНИЯ ПОРОШКОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА Поляков П. А., Поляков А. П., Мичуров Н. С.	44
ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ТЕРМОБАРЬЕРНОГО ПОКРЫТИЯ Пугачева Н. Б., Гузанов Б. Н., Обабков Н. В., Быкова Т. М., Мичуров Н. С.	45
О ВОЗМОЖНОСТИ МУЛЬТИМОДАЛЬНОГО ДЕМПФИРОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ С ПОМОЩЬЮ ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТА, ШУНТИРОВАННОГО RL-ЦЕПЬЮ Севодина Н. В., Юрлова Н. А., Ошмарин Д. А., Юрлов М. А.	46
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ ИЗ ЭПОКСИДНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КЛЕЕВ МЕТОДОМ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ Смирнов С. В., Веретенникова И. А., Смирнова Е. О., Пестов А. В.	49
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ПОЛИМЕРНОГО ПОКРЫТИЯ ПРИ ИНДЕНТИРОВАНИИ Смирнов С. В., Мясникова М. В., Смирнова Е. О., Коновалов Д. А., Пестов А. В., Игумнов А. С.	50
DEVELOPMENT OF HIGH-PERFORMANCE LOW-TEMPERATURE PLASMA GENERATORS FOR VARIOUS PROCESSES Sazonov M. I., Khvisevich V. M., Verameichyk A. I., Zheltkovich A. E., and Batrak V. V.	52
УВЕЛИЧЕНИЕ КАСАТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ ДИАГРАММ ДЕФОРМИРОВАНИЯ	53

СЛОИСТЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ Северов П. Б.	
ПОВЕРХНОСТНЫЙ ЭФФЕКТ АКУСТИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ МЕТАЛЛОВ Третьяков Д. А., Беляев А. К., Полянский В. А.	54
МЕТОДЫ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ЗАДАЧЕ УПРАВЛЕНИЯ ИНСТРУМЕНТОМ ПРИ ЛИСТОВОЙ РЕЗКЕ НА МАШИНАХ С ЧПУ Ченцов А. Г.	56
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МАГИСТРАЛЬНОМ ГАЗОПРОВОДЕ Шардаков И. Н., Цветков Р. В., Шестаков А. П., Глот И. О.	58
ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРАЦИИ СТУПЕНЕЙ ЭЦН НА ЛАБОРАТОРНОМ ИСПЫТАТЕЛЬНОМ СТЕНДЕ Петрухин В. В., Петрухин С. В.	59
АНАЛИЗ ФОРМОИЗМЕНЕНИЙ ЭЛЕКТРОУПРУГИХ ТЕЛ ПРИ ПОДАЧЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА НА ЭЛЕМЕНТЫ ИЗ ПЬЕЗОМАТЕРИАЛОВ Севодина Н. В., Юрлова Н. А., Ошмарин Д. А., Юрлов М. А.	61
СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СВС-КОМПОЗИТОВ Пугачева Н. Б., Николин Ю. В.	63
ОДНОНАПРАВЛЕННЫЕ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНЫЕ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ С ГРАНИЧНЫМ УСЛОВИЕМ НАВЬЕ Бурмашева Н. В., Просвиряков Е. Ю.	65
ОДНОНАПРАВЛЕННЫЕ ТЕЧЕНИЯ МАРАНГОНИ–ПУАЗЕЙЛЯ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ С ГРАНИЧНЫМ УСЛОВИЕМ НАВЬЕ Бурмашева Н. В., Просвиряков Е. Ю.	66
ОДНОНАПРАВЛЕННЫЕ КОНВЕКТИВНЫЕ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ С ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЕМ В ЗАМКНУТОМ СЛОЕ Бурмашева Н. В., Ларина Е. А., Просвиряков Е. Ю.	67
АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ	70

Научное издание

Международная конференция
«МЕХАНИКА, РЕСУРС И ДИАГНОСТИКА МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ»
сборник материалов (Екатеринбург, 09–13 декабря 2019 г.)

Рекомендовано к изданию
Ученым советом ИМАШ УрО РАН

Ответственный за выпуск *Худорожкова Ю.В.*
Компьютерная верстка *Гариева А.В.*



Подписано в печать 06.09.2019. Формат 60×84 1/16
7,54 п.л.

Оригинал-макет изготовлен в
Научно-редакционном отделе ИМАШ УрО РАН
620049, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34