

УДК 620.179.6:539.43

## ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ОБРАЗЦОВ НА ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЛАВА Д16АТ<sup>1</sup>

© К. В. Захарченко, В. И. Капустин<sup>2</sup>*Статья поступила 18 июня 2014 г.*

Описана методика, позволяющая исследовать влияние модификации поверхности на характеристики деформирования структурно-неоднородного образца. Получены диаграммы деформирования образцов из сплава Д16АТ при ступенчатом увеличении нагрузки, позволяющие оценить сопротивление деформированию структурно-неоднородных образцов в области экстремальных напряжений цикла. Экспериментально показано, что плакировочный слой с механическими свойствами, более низкими, чем материал подложки, снижает сопротивление деформированию, а слой, изготовленный методом вибрационной ударной обработки, повышает сопротивление деформированию образцов.

**Ключевые слова:** поверхностный слой; упругопластическое деформирование; выносливость.

Согласно современным представлениям зарождение и развитие усталостных трещин происходит в большинстве случаев в поверхностном слое образца. Схемы начального роста трещин, используемые в работе [1], основаны на предположениях о том, что трещина развивается с поверхности, а рабочая часть образца выполнена из материала, однородного по структуре и механическим свойствам. Однако эта гипотеза не всегда верна.

Имеется множество свидетельств в пользу того, что механические свойства поверхностного слоя образцов и деталей машин оказывают значительное влияние на сопротивление усталостному разрушению, а следовательно, на ресурс [1 – 5]. При этом под поверхностным слоем понимают модифицированный слой материала с аномальными механическими свойствами, сформированный под воздействием технологических операций: обработки резанием, шлифования, полирования, поверхностно-пластического деформирования, химико-термической обработки, а также плакирование. Влияние этих операций может в различной степени изменять структуру и механические свойства материала слоя, поэтому исследуемый образец следует рассматривать как объект с неоднородными свойствами и структурой.

В монографии [6] состояние поверхностного слоя оценивается по величине остаточных напряжений, твердости, толщине, микрорельефу поверхности. Отметим, что одноосный подход, используемый в изучении деформированного состояния материала при повторных нагружениях, не всегда позволяет охватить множество различных механизмов упругопластиче-

ского поведения образцов материала в процессе усталости. Как правило, результат подобных исследований ограничивается определением влияния слоя на предел выносливости материала, а механизм упрочнения или разупрочнения материала, описание процесса его деформирования остаются за рамками исследования.

При решении проблемы повышения сопротивления усталостному разрушению необходимо знать не только толщину поверхностного слоя, природу возникновения, взаимодействие с основным материалом, но и деформационные характеристики, оказывающие влияние на выносливость образцов. В первую очередь следует обратить внимание на такую характеристику, как условный предел упругости. Его использование позволяет исключить разрушающие методы, значительно ускоряет процесс оценки свойств материала, уменьшает количество образцов. Изучение деформирования за пределом упругости позволяет на стадии предразрушения и зарождения усталостных трещин получать дополнительную информацию о кинетике диссипативных процессов, сопровождающих необратимые изменения в материале при периодическом нагружении.

Для вскрытия механизма влияния поверхностного слоя на сопротивление деформированию и разрушению недостаточно данных о механических свойствах покрытия или выносливости образцов с покрытием. Предполагается, что результат взаимодействия покрытия и материала подложки будет сказываться не только на выносливости, но и на закономерностях неупругого периодического деформирования структурно-неоднородных образцов, на образовании диссипативных структур.

В данной работе описана методика исследования деформационных характеристик структурно-неоднородных образцов, позволяющая оценивать вклад поверхностного слоя в деформированное состояние

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-08-31352.

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия; e-mail: Zaharchenkov@mail.ru, macler06@mail.ru

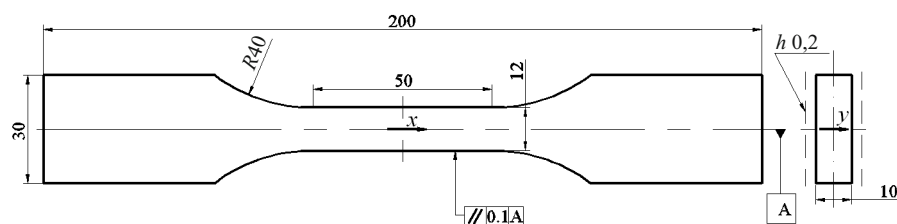


Рис. 1. Схема образца для исследования

образца. Кроме того, проведено сравнение закономерностей периодического деформирования образцов материала с покрытиями, имеющими некоторые anomальные механические свойства, и материала подложки.

Исследовали покрытия, влияние которых на характеристики выносливости образцов достаточно хорошо изучено, а технология их изготовления отработана и нашла применение в промышленности. Партии образцов (рис. 1) изготавливали из плиты алюминиевого сплава Д16АТ (ГОСТ 17232–99). На рис. 1 указаны стороны нанесения плакировки, основные размеры и расположение осей  $x$  и  $y$  при измерении деформаций рабочей части образца.

Были рассмотрены следующие четыре варианта поверхностного слоя.

1. На поверхность образца нанесена плакировка толщиной ~200 мкм из технически чистого алюминия марки АД1 (состояние поставки плиты Д16АТ).

2. С поверхности образца методом размерного химического травления удалена плакировка (около 350 мкм с каждой стороны).

3. Поверхность образца после удаления плакировки подвергнута упрочняющей вибрационной ударной обработке. (Такие образцы изготавливали по типовой технологии с использованием автоматизированной вибрационной машины ВУД-2500. Интенсивность обработки измеряли величиной прогиба стандартных образцов-свидетелей — пластинок Альмена.)

4. С поверхности образца после упрочняющей вибрационной ударной обработки частично удален упрочненный слой (около 400 мкм с каждой стороны).

Выбор материала и вида поверхностного слоя обусловлен тем, что сплав Д16Т широко используется в самолетостроении. Этот материал поставляется в виде листов и плит с плакировкой, которая обеспечивает катодную защиту основного материала. Поскольку при изготовлении некоторых деталей плакировка с поверхности может быть удалена, то логично рассмотреть деформирование образцов без плакировки и с упрочненной поверхностью. Химическое травление материала — наиболее удобный и широко применяющийся в производстве способ, при помощи которого можно удалить поверхностный слой без деформирования основного материала.

При исследовании деформированного состояния образцов с поверхностным слоем полагали, что пол-

ная деформация образца определяется суммарным вкладом деформации поверхностного слоя и подложки. Удаление слоя материала с поверхности позволяло определить его влияние на сопротивление деформированию.

За базовый (для сравнения) принимали образец со снятым плакирующим слоем методом химического травления. У такого образца поверхностный слой идентичен подложке по химическому составу, механическим свойствам и структуре.

При определении характеристик деформирования образцы нагружали на универсальной сервогидравлической испытательной машине Instron 8801, которая позволяла деформировать образцы без кинематических ограничений и обеспечивала мягкий режим нагружений. Для измерения приращения компонент тензора полных деформаций *in situ* использовали штатные экстензометры: № 2620-601 Dynamic Extensometer, № W-E-404-F «Transverse/Diametral Extensometer».

Деформации образца определяли по формулам

$$\varepsilon_x = (l_x - l_{0x}) / l_{0x};$$

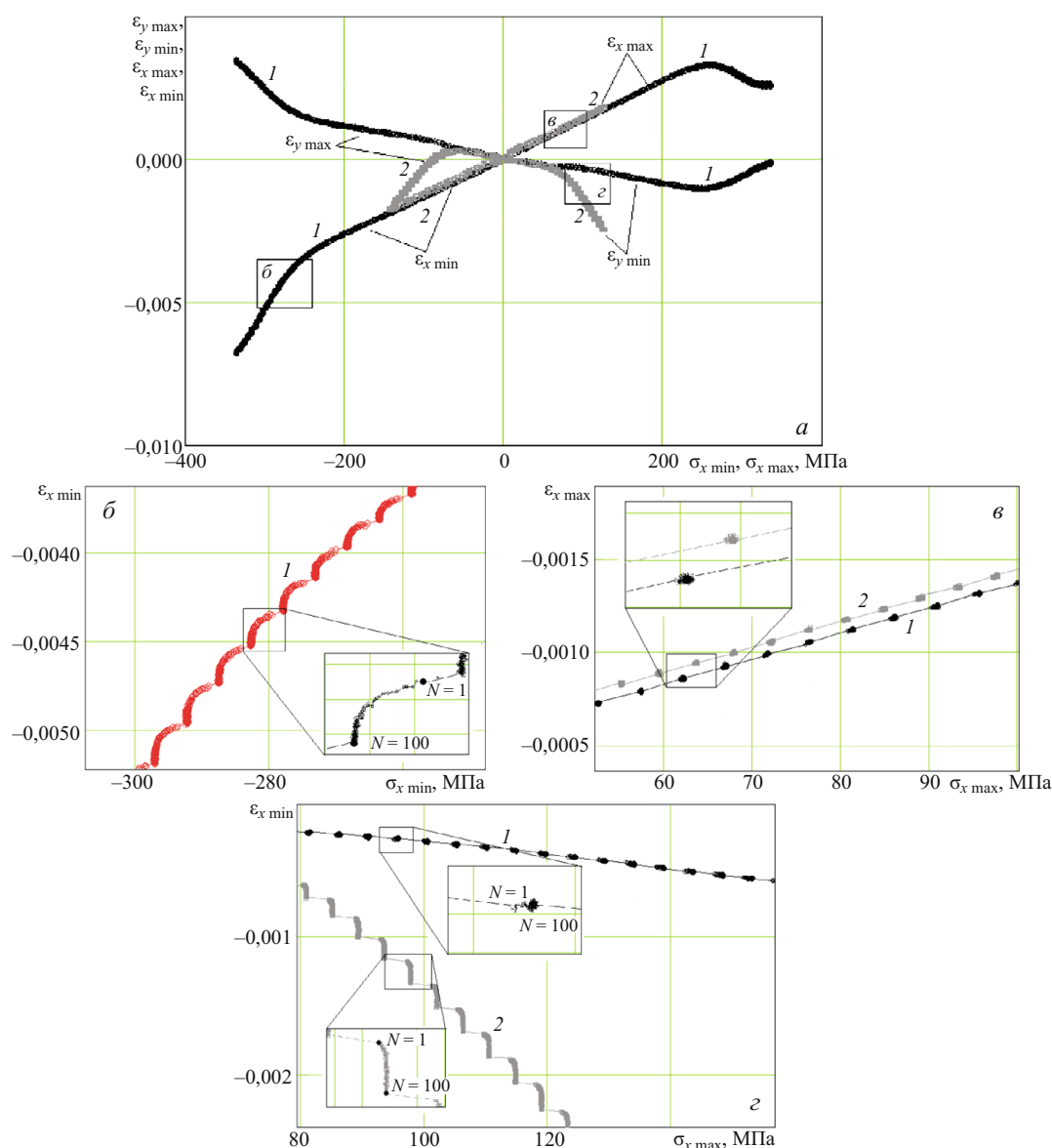
$$\varepsilon_y = (b_y - b_{0y}) / b_{0y},$$

где  $l_{0x}$  — база экстензометра продольных деформаций (равна 25 мм);  $l_x - l_{0x}$  — изменение длины образца на базе экстензометра;  $b_{0y}$  — база экстензометра поперечных деформаций;  $b_y - b_{0y}$  — изменение толщины рабочей части. База экстензометра поперечных деформаций для образцов первой партии определялась толщиной плакированного листа — ~9,95 мм, второй и третьей партии — разницей толщин плакированного листа и стравленного слоя — ~9,3 мм, четвертой партии — ~8,5 мм.

При проведении опытов по деформированию образцов дискретные данные о нагружении и деформациях сохраняли в текстовом формате для последующего анализа; частота дискретизации — 100 точек на цикл. При такой частоте погрешность определения амплитуды измеряемой характеристики составила ~0,2 %.

При анализе массива экспериментальных данных определяли номер цикла нагружения, после чего в каждом цикле гармонического нагружения находили фактические максимальные ( $\sigma_{\max}$ ) и минимальные ( $\sigma_{\min}$ ) напряжения, максимальные и минимальные значения продольной ( $\varepsilon_{x \max}$ ,  $\varepsilon_{x \min}$ ) и поперечной ( $\varepsilon_{y \max}$ ,  $\varepsilon_{y \min}$ ) деформаций. Таким образом, в цикле нагружения были известны порядковый номер цикла и две компоненты деформации для каждого пикового значения напряжения в цикле.

Для разделения областей упругого (обратимого) и неупругого (упругопластического и необратимого)



**Рис. 2.** Диаграммы деформирования образцов без плакировки (1) и с плакирующим слоем (2): а — влияние плакировки; б, в — фрагменты диаграмм в области малых упругопластических деформаций и в упругой области

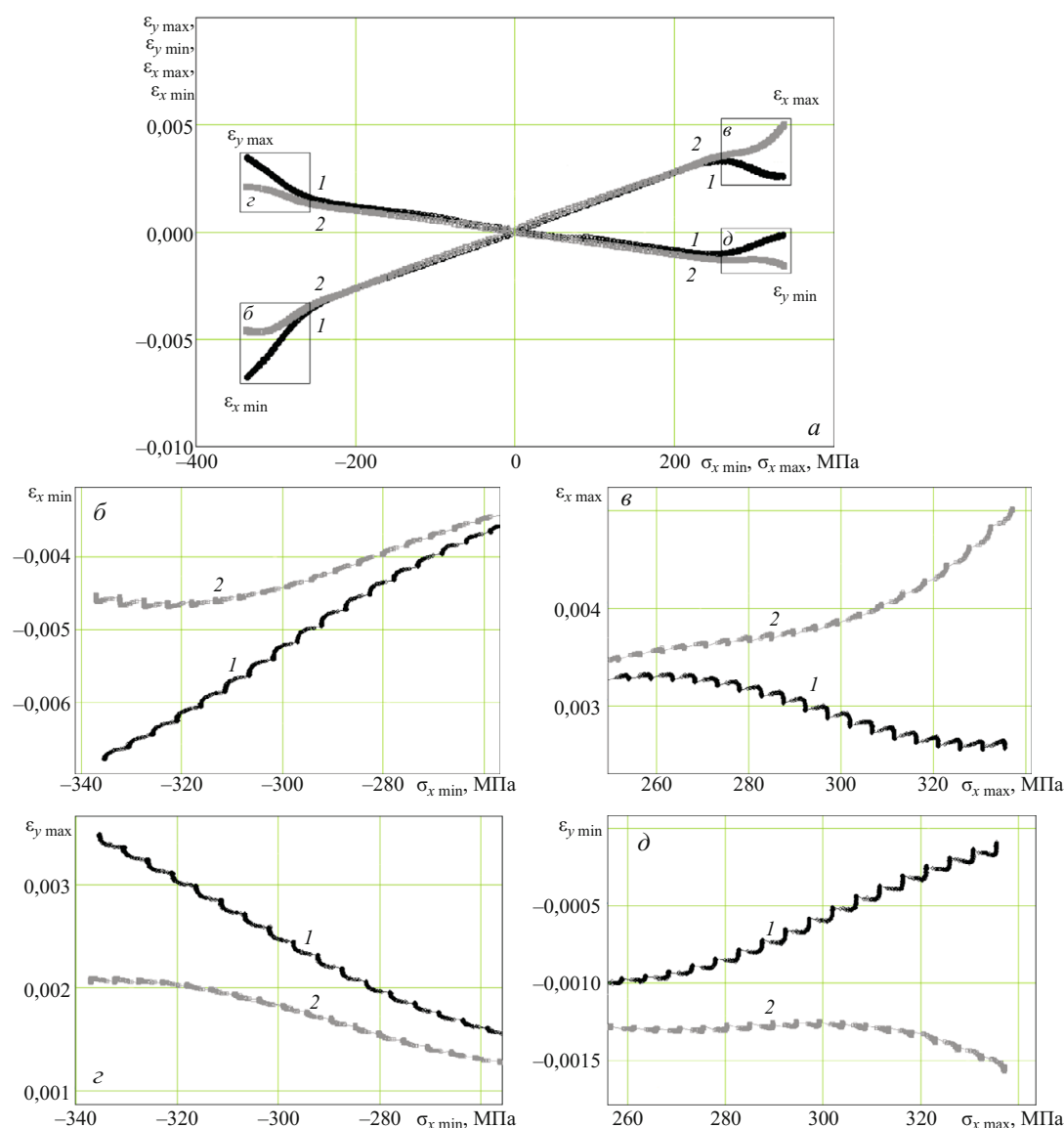
деформирования образец выводили из состояния термодинамического равновесия путем нагружения периодической нагрузкой со ступенчато увеличивающейся амплитудой напряжения в цикле так, чтобы момент возникновения слабонеравновесного состояния можно было обнаружить по изменению характеристик напряженно-деформированного состояния.

Программа нагружений представляла собой последовательность блоков со ступенчато увеличивающейся амплитудой напряжения. Каждый блок содержал 100 циклов нагружения по гармоническому закону с частотой 1 Гц постоянной амплитуды и нулевым средним напряжением в цикле. Величина приращения амплитуды нагрузки для каждой ступени составляла 500 Н. Количество циклов в блоке нагружения обусловлено необходимостью задания некоторого времени, необходимого системе образец – маши-

на для того, чтобы выйти на режим, заданный в программе нагружения.

На рис. 2 представлены экспериментальные диаграммы деформирования образцов с плакировочным слоем и без него при симметричном цикле напряжений. Здесь  $\epsilon_{x \max}$  и  $\epsilon_{y \min}$  — продольная и поперечная деформации при максимальном напряжении в цикле  $\sigma_{x \max}$ ;  $\epsilon_{x \min}$  и  $\epsilon_{y \max}$  — продольная и поперечная деформации при минимальном напряжении в цикле  $\sigma_{x \min}$ . Диаграммы получены в результате последовательного соединения точек, которые соответствуют пиковым значениям деформаций и напряжений и представляют собой участки параметрических зависимостей, где параметр — число циклов нагружения  $N$ .

Рассмотрим диаграммы 1 деформирования образца без плакировки (см. рис. 2, а), на которых можно выделить области нагружения, которые отвечают за упругое и неупругое деформирование. Например, из



**Рис. 3.** Диаграммы деформирования образцов без плакировки (1) и подвергнутых упрочняющей вибрационной ударной обработке (2): б – д — фрагменты диаграмм в области упругопластического деформирования (б, в и г, д — продольные и поперечные деформации)

фрагмента рис. 2, в видно, что если деформирование происходит в упругой области, то деформации образцов при пиковых нагрузках не меняются и проецируются на диаграмме практически в одну точку. Из фрагмента рис. 2, в следует, что в области неупругого деформирования деформации на каждой ступени нагружения образца без плакировки изменяются, подчиняясь некоторому нелинейному закону.

Кроме того, из рис. 2, а можно видеть, что для образца без плакировки (диаграмма 1) при увеличении амплитуды напряжения в цикле (независимо от знака напряжения в цикле) поперечная и продольная деформации имеют тенденции к одностороннему накоплению. Согласно модели деформирования [7] осевая пластическая деформация материала является следствием пластических сдвигов по двум или четырем плоскостям максимальных касательных напряжений. Пластические сдвиги на этих плоскостях определяют

ся деформационной прочностью материала, которая предполагается различной в разных системах площадок, а также зависит от направления деформирования. Как следует из обсуждаемых опытов, при симметричных циклах нагружения образец укорачивается и утолщается. Это свидетельствует о том, что исследуемый образец материала обладает более низкими характеристиками сопротивления деформированию при сжатии, чем при растяжении.

Из диаграмм деформирования 2 образца с плакирующим слоем на рис. 2, а и рис. 2, в видно, что в рассматриваемом интервале напряжений продольные деформации описываются законом Гука, как и деформации образца со снятой плакировкой.

Следует обратить внимание на диаграммы поперечных деформаций  $\varepsilon_{y \max}$ ,  $\varepsilon_{y \min}$  плакированных образцов на рис. 2, а и г. Видно, что при амплитуде цикла напряжений  $\sim 80$  МПа возникает нелинейный эффект.

Неупругое поведение плакировки проявляется при напряжениях, значительно меньших предела текучести материала подложки. Такое поведение объясняется значительно более низким пределом текучести материала АД1 ( $\sigma_p = 30$  МПа), который используется в качестве плакирующего слоя плиты из сплава Д16АТ ( $\sigma_p = 275$  МПа).

На рис. 3 представлены экспериментальные диаграммы деформирования образцов без плакировки и подвергнутых упрочняющей вибрационной ударной обработке, полученные при симметричном цикле нагружения.

Из рис. 3, а видно, что диаграммы деформирования 2 в отличие от 1 имеют немонотонный характер. Это свидетельствует о том, что упрочняющая обработка приводит к изменению сопротивления деформированию, при котором в области неупругого деформирования у упрочненного образца накопление деформаций происходит по двум механизмам. Первый механизм проявляется в том, что сопротивление деформированию образца в области сжимающих напряжений оказывается меньшим, чем в области растяжения. Это видно из рис. 3, б – д, где диаграммы 2 свидетельствуют о накоплении деформаций в области сжатия и отрицательных напряжений цикла, вплоть до амплитуды напряжений 310 МПа. При дальнейшем увеличении амплитуды реализуется второй механизм накопления деформаций: приращение деформаций меняет знак, и рост деформаций происходит уже в области растягивающих напряжений.

Для оценки чувствительности способа и определения влияния поверхностного слоя на механические характеристики образцов выполнялось послойное удаление упрочненного слоя методом размерного химического травления.

На рис. 4 представлены диаграммы деформирования образцов с различной толщиной поверхностного слоя. Видно, что диаграмма деформирования 2 образца с частично удаленным поверхностным слоем занимает промежуточное положение между диаграммами эталонного 1 и упрочненного 3 образцов. Удаление значительной толщины поверхностного слоя (~400 мкм) с упрочненного образца не ликвидирует эффект влияния слоя полностью.

Таким образом, описана методика и представлены экспериментальные результаты исследования деформированного состояния структурно-неоднородных образцов при периодических нагружениях. Методика позволяет, например, обнаружить неравновесный процесс деформирования при напряжениях ~80 МПа и установить влияние плакированного слоя на сопротивление деформированию. Анализ выносливости материала с плакировкой [6] показал, что она также приводит к снижению предела ограниченной выносливости материала.

Обнаруженные деформационные свойства материала с плакировкой могут иметь значение при обес-

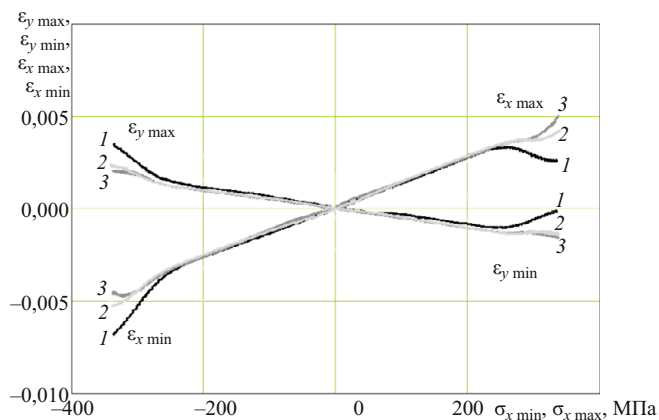


Рис. 4. Диаграммы деформирования образцов с различной толщиной поверхностного слоя: 1 – 3 соответствуют эталонному образцу, образцу с частично удаленным поверхностным слоем и упрочненному образцу

печении работоспособности прочноплотных заклепочных соединений. Несущая способность таких соединений будет снижаться за счет течения плакировки и уменьшения величины натяга при нагружении конструктивного образца повторными напряжениями выше 80 МПа.

Результаты экспериментальных исследований образцов материала после вибрационной ударной обработки свидетельствуют, что используемый подход позволяет определить не только амплитуду напряжения, при которой возникнет слабонерасовное деформированное состояние, но и опасный полцикл (растяжение или сжатие), в котором это состояние возникло.

В опытах с переменной толщиной модифицированного слоя показано, что влияние поверхностного слоя на осредненные деформационные свойства структурно-неоднородных образцов оказывается настолько существенным, что может изменить знак приращения деформаций в цикле нагружения.

В заключение отметим, что исследователь при определении характеристик выносливости и живучести реальных изделий и характеристик материала обычно имеет дело со структурно-неоднородными образцами. Вклад поверхностного слоя в характеристики выносливости или живучести материала может оказаться неопределенным, если не учитывать фактические деформационные свойства структурно-неоднородного образца или не принимать специальных мер по обеспечению однородности механических свойств и структуры.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Miller K. J. Materials science perspective of metal fatigue resistance / *Anales de mecanica de la fractura*. 1995. Vol. 12. P. 1 – 10.
2. Тушинский Л. И., Плохов А. В., Столбов А. А., Синдеев В. И. Конструктивная прочность композиции основной металл – покрытие. — Новосибирск: Наука, 1996. — 296 с.

3. Терентьев В. Ф., Петухов А. Н. Усталость высокопрочных металлических материалов. — М: ИМЕТ РАН – ЦИАМ, 2013. — 515 с.
4. Шанивский А. А. Моделирование усталостных разрушений металлов. Синергетика в авиации. — Уфа: Монография, 2007. — 500 с.
5. Кузнецов Н. Д., Цейтлин В. И., Волков В. И. Технологические методы повышения надежности деталей машин. — М: Машиностроение, 1993. — 304 с.
6. Кишккина С. И. Сопротивление разрушению алюминиевых сплавов. — М: Металлургия, 1981. — 280 с.
7. Капустин В. И., Степанов В. М. О связи между напряжениями и деформациями при периодических нагружениях / Прикладная механика и техническая физика. 2006. Т. 47. № 3. С. 92 – 99.

## REFERENCES

1. Miller K. J. Materials science perspective of metal fatigue resistance / Anales de mecanica de la fractura. 1995. Vol. 12. P. 1 – 10.
2. Tushinskii L. I., Plokhov A. V., Stolbov A. A., Sindeev V. I. Konstruktivnaya prochnost' kompozitsii osnovnoi metall – pokrytie [Constructive strength of basic metal-coating composition]. — Novosibirsk: Nauka, 1996. — 296 p. [in Russian].
3. Terentjev V. F., Petukhov A. N. Ustalost' vysokoprochnykh metallicheskiykh materialov [Fatigue of high strength metallic materials]. — Moscow: Izd. A. A Baikov IMET RAN – TsIAM, 2013. — 514 p. [in Russian].
4. Shaniavski A. A. Modelirovanie ustalostnykh razrushenii metallov. Sinergétika v aviatsii. [Modeling of fatigue cracking of metals. Synergetics for aviation]. — Ufa: Monografiya, 2007. — 500 p. [in Russian].
5. Kuznetsov N. D., Tseytlin V. I., Volkov V. I. Tehnologicheskie metody povysheniya nadezhnosti detalei mashin [Technological methods to improve the reliability of machine parts]. — Moscow: Mashinostroenie, 1993. — 304 p. [in Russian].
6. Kishkina S. I. Soprotivlenie razrusheniyu alyuminievykh splavov [Fracture resistance of aluminum alloys]. — Moscow: Metallurgiya, 1981. — 280 p. [in Russian].
7. Kapustin V. I., Stepanov V. M. O svyazi mezhdu napryazheniyami i deformatsiyami pri periodicheskikh nagruzheniyakh [Stress-strain relationship for periodic loading] / Prikl. Mekh. Tekhn. Fiz. 2006. Vol. 47. N 3. P. 92 – 99 [in Russian].

УДК 620.168.37:531.781

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В СТАЛИ МЕТОДОМ МАГНИТОУПРУГОГО РАЗМАГНИЧИВАНИЯ

© С. М. Кулак, В. Ф. Новиков<sup>1</sup>

*Статья поступила 18 февраля 2014 г.*

Исследована зависимость напряженности магнитного поля рассеяния локальной намагниченности  $\Delta H_r$  стали, вызванного вариацией (уменьшением и восстановлением) нагрузки, от величины механических напряжений стального образца. Показана возможность измерения механических напряжений металлических конструкций с помощью метода дозированного разгрузки (уменьшения механического напряжения  $\sigma$  на заданную величину  $\Delta\sigma$  и возврата к исходному значению). Физической основой метода является нелинейная зависимость магнитоупругого размагничивания  $\Delta M$  стали от величины нагрузки  $\sigma$  и ее вариации  $\Delta\sigma$ . Предложен вариант практической реализации метода.

**Ключевые слова:** ферромагнетик; магнитоупругое размагничивание; локальная намагниченность; механические напряжения; дозированное разгрузка.

Конструкции, выполняемые из ферромагнитных материалов (например, газо- и нефтепроводы, мосты, вышки высоковольтных линий электропередач, подъемные краны и т.д.), в процессе эксплуатации испытывают постоянно меняющиеся по величине и направлению механические напряжения, которые могут приводить к авариям и разрушению. Наиболее опасными из них являются нагрузки, которые трудно или даже невозможно учесть в расчетах при проектировании: деформации элементов во времени, подвижки грунта, коррозию и многое другое [1 – 7].

Поэтому приборный контроль напряженного состояния элементов конструкций является одной из наиболее приоритетных задач в обеспечении их безотказной и безопасной эксплуатации [8 – 13].

На протяжении последних 50 лет механические напряжения металлических конструкций как в нашей стране, так и за рубежом определяют преимущественно расчетными или тензометрическими методами [14 – 16]. Проведенный сравнительный анализ [17] методов, используемых в отечественной нефтегазовой промышленности для определения напряжений, показал, что сходимость их результатов составляет не более 30 %. Кроме того, не все приборные методы мож-

<sup>1</sup> Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень, Россия; e-mail: physics1@tgngu.tyumen.ru