

УДК 669

А. М. ЩИПАЧЕВ, Е. В. ПОЯРКОВА

ВЛИЯНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ НА ТВЕРДОСТЬ И ВНУТРЕНнюю НАКОПЛЕНную ЭНЕРГИЮ МЕТАЛЛА

Проведены исследования распределений микротвердости образцов из стали 30ХГСНА после различной циклической наработки. Микротвердость замерялась на глубине 0,08; 0,27 и 0,37 мм от поверхности с использованием оригинальной методики. Показано, что на глубине 0,08 мм по мере циклической наработки происходит рост, затем падение микротвердости, что согласуется с данными других исследователей и обусловлено влиянием поверхности. На глубинах 0,27 и 0,37 мм по мере циклической наработки происходит стабильный рост микротвердости, при этом происходит уменьшение дисперсии ее распределения. Сделано предположение, что накопление энергии при циклическом нагружении происходит в первую очередь в микро-объемах, имеющих минимальную твердость, что вызывает уменьшение дисперсии. Показана связь микротвердости с плотностью дислокаций и внутренней накопленной энергией материала.

Твердость; усталость; повреждаемость; закон распределения

Вопросу изменения твердости (и микротвердости) в результате циклического нагружения посвящено достаточно большое число исследований. Полученные в них результаты в обобщенном виде представлены на рис. 1. В большинстве работ отмечается две стадии в кинетике изменения твердости: вначале ее повышение, а затем снижение.

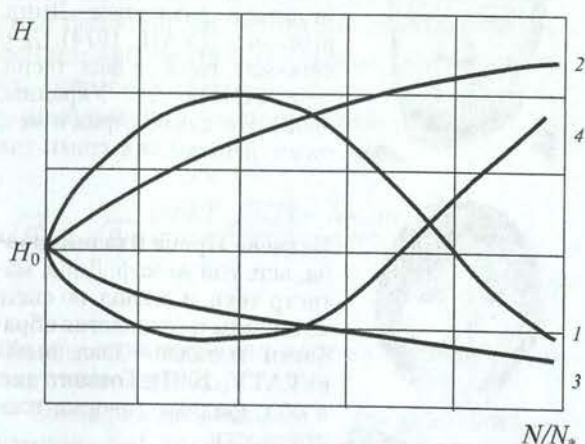


Рис. 1. Обобщенные кривые изменения твердости H поверхности образцов различных материалов в зависимости от относительного числа циклов нагружения N/N^*

Рассмотрим в качестве примера, как наиболее типичные, результаты работы [1]. Исследовалась сталь 45 и три марки чугунов различных классов. Микротвердость измерялась непосредственно на рабочей части образца, приготовленной как металлографический

шлиф, на приборе ПМТ-3 при нагрузке 0,1 Н. Образцы имели фиксированные опасные сечения и испытывались на консольный изгиб с вращением. Оказалось, что начальная стадия изменения микротвердости характеризовалась упрочнением; продолжительность этого периода зависела от уровня напряжений: чем он был выше, тем интенсивнее и быстрее протекал процесс упрочнения. Затем упрочнение сменялось разупрочнением вплоть до уменьшения твердости ниже исходного значения. Кинетика изменения микротвердости соответствовала кривой 1 на рис. 1. Когда величина действующих напряжений была равна или ниже предела выносливости, период упрочнения распространялся на всю принятую базу испытаний, совпадая по характеру с кривой 2.

Практически аналогичные результаты изменения твердости были получены ранее О. И. Гущей [2], В. И. Беляевым [3] и другими авторами, подробный обзор исследований которых проделан В. С. Ивановой и Л. К. Гордиенко [4].

Авторами работы [5] метод микротвердости использовался для исследования изменений, происходящих в процессе эксплуатации рабочих лопаток турбин авиационного двигателя, а также в процессе их испытаний на выносливость при комнатной и рабочих температурах. Получено, что в начальный период твердость повышается, а затем медленно снижается, не достигая исходного уровня на

базе испытаний. При этом рост микротвердости был выше в процессе испытаний при высоких температурах, что объяснялось автрами как следствие фазовых превращений в метастабильных лопаточных сплавах. Микротвердость измеряли на ПМТ-3 при нагрузке 1 Н на расстоянии не более 0,5 мм от задней кромки лопатки. Отпечатки наносились по возможности в центре зерен и осреднялись по 5-ти замерам.

Данные, полученные И. Хартмутом [6] при исследовании изменения микротвердости алюминийсодержащего сплава Д16Т в процессе усталости несколько отличаются от результатов других авторов. Показано, что в начальный период микротвердость возрастает, затем, после достижения некоторого максимального значения упрочнения, наступает второй период, характеризующийся снижением ее до различной величины. После прохождения экстремальной величины разрушения твердость снова начинает повышаться вплоть до момента разрушения образца. Практически аналогичные кривые были получены как при симметричном, так и при асимметричном циклах напряжения, причем относительное упрочнение образцов зависело и от амплитуды напряжений, и от среднего напряжения.

Обстоятельные исследования влияния циклического нагружения на твердость были проведены А. А. Гольденбергом с сотрудниками [7-9] на алюминиевых сплавах Д16, В95, АД33, меди М2 и стали 30ХГСА. Алюминиевые сплавы и медь исследовались в отожженном состоянии и после нагартовки (в чем состояла сущность последней — в статье не указывается), сталь 30ХГСА — в низкоотпущенном и улучшенном состояниях. Эти исследования показали, что для получения сравнимых результатов необходимо проводить не менее 200 замеров микротвердости и последующую статистическую обработку, так как разброс значений ее очень велик.

Как и предыдущие исследователи, А. А. Гольденберг с сотрудниками получили для алюминиевых сплавов схожие по характеру результаты (отличающиеся от кривых И. Хартмута). При этом их данные следует считать достаточно достоверными, поскольку каждую точку диаграммы определяли на основе кривой распределения микротвердости для данной наработки, построенной по результатам не менее 200 замеров. Для стали 30ХГСА обнаружены отличия в поведе-

нии от других исследованных материалов. В работе [8] сделаны следующие выводы.

1) В результате циклического нагружения на образцах из отожженных пластических металлов (медь М2 и сплав В95) наблюдается сначала повышение микротвердости, а затем ее уменьшение ниже исходного уровня и последующее разрушение, т. е. имеет место соответствие кривой 1 на рис. 1.

2) При циклическом нагружении нагартованных пластических материалов наблюдается монотонное снижение микротвердости по мере увеличения длительности нагружения (кривая 3 на рис. 1).

3) При циклическом нагружении термически упрочненной стали 30ХГСА микротвердость сначала снижается, а затем возрастает; разрушение отмечается при повышении микротвердости (кривая 4 на рис. 1). Первый период авторы объясняют рассасыванием областей искажений кристаллической решетки за счет облегчения условий диффузии при начальных циклических нагружениях, а дальнейшее повышение — с процессом нагартовки.

Аналогичные по характеру результаты были получены и авторами при исследовании твердости по Виккерсу поверхности образцов из сталей У8 и 30ХГСА при различных видах циклического нагружения. Исследования характера изменения твердости стали У8 проводились при консольном изгибе с вращением. Оказалось, что при напряжениях цикла, превышающих предел выносливости, твердость изменяется в соответствии с кривой 1 на рис. 1, а при более низких напряжениях она сначала понижается, а затем растет — как кривая 4.

Подобные по характеру результаты получены ранее в работе [2] для стали У9А. Изменение твердости стали 30ХГСА исследовалось при испытаниях на растяжение-сжатие. Характер изменения твердости при испытаниях выше предела выносливости соответствовал кривой 1, а ниже предела выносливости — кривой 3 рис. 1.

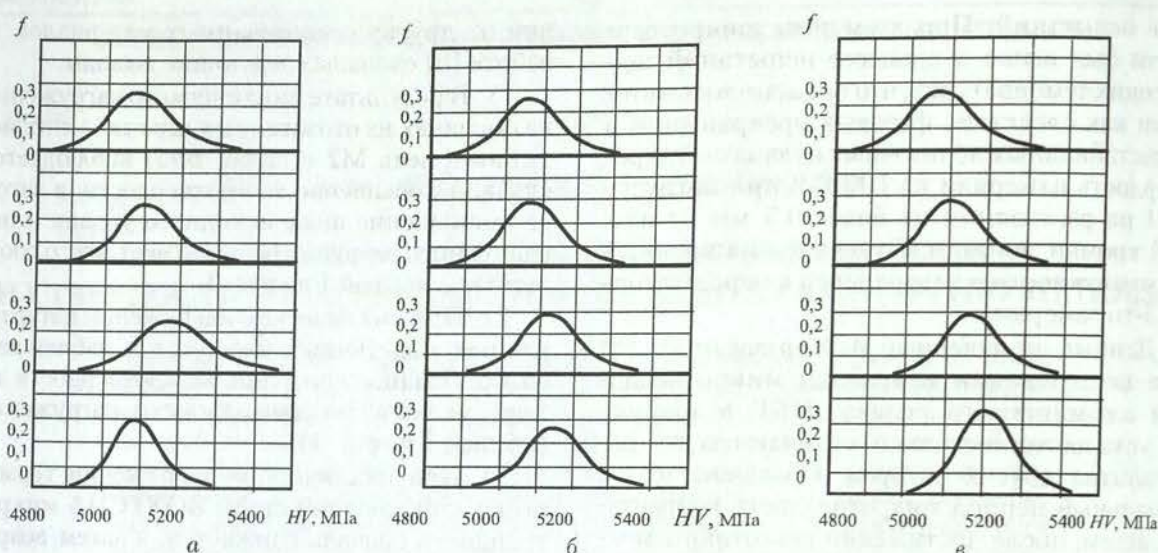


Рис. 2. Кривые распределения микротвердости электрополированных образцов из стали 30ХГСНА после различной циклической наработки: а — на глубине 0,08 мм; б — на глубине 0,27 мм; в — на глубине 0,37 мм от поверхности. Циклическая наработка (сверху вниз): 0, 10, 55 и 67% от долговечности

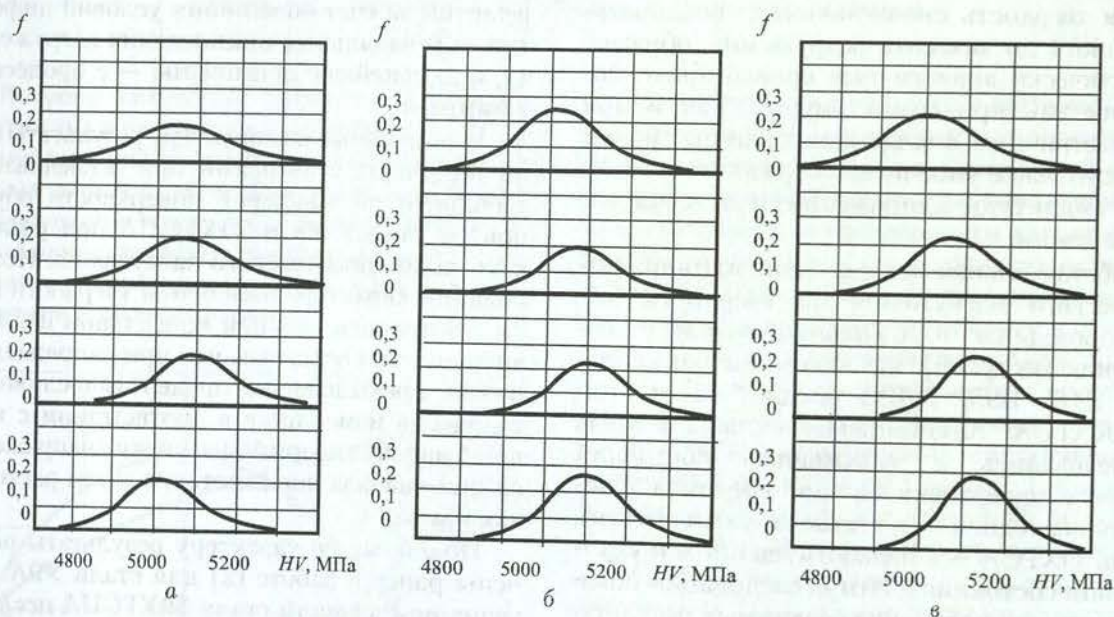


Рис. 3. Кривые распределения микротвердости шлифованных образцов из стали 30ХГСНА после различной циклической наработки: а — на глубине 0,08 мм; б — на глубине 0,27 мм; в — на глубине 0,37 мм от поверхности. Циклическая наработка (сверху вниз): 0, 10, 40 и 80% от долговечности

Таким образом, к настоящему времени накоплен обширный экспериментальный материал, который требует своего осмысления с сдвинутых позиций для объяснения различного характера в поведении кривых изменения твердости и несоответствия их во многих случаях теоретическим представлениям энергетической теории прочности и разрушения В. В. Федорова [11, 12], в соответствии с которым плотность скрытой энергии, а следовательно, и твердость, должны монотонно увеличиваться.

Причина этого может заключаться в том, что твердость в процессе циклического нагружения замерялась на поверхности образцов, а поверхностные слои обладают свойствами, отличающимися от свойств материала в целом, поскольку являются свободной поверхностью, что создает дополнительные условия для высвобождения накапливаемой в процессе циклического нагружения энергии.

В связи с этим были проведены исследования по сравнению закономерностей изменения микротвердости слоев металла, распо-

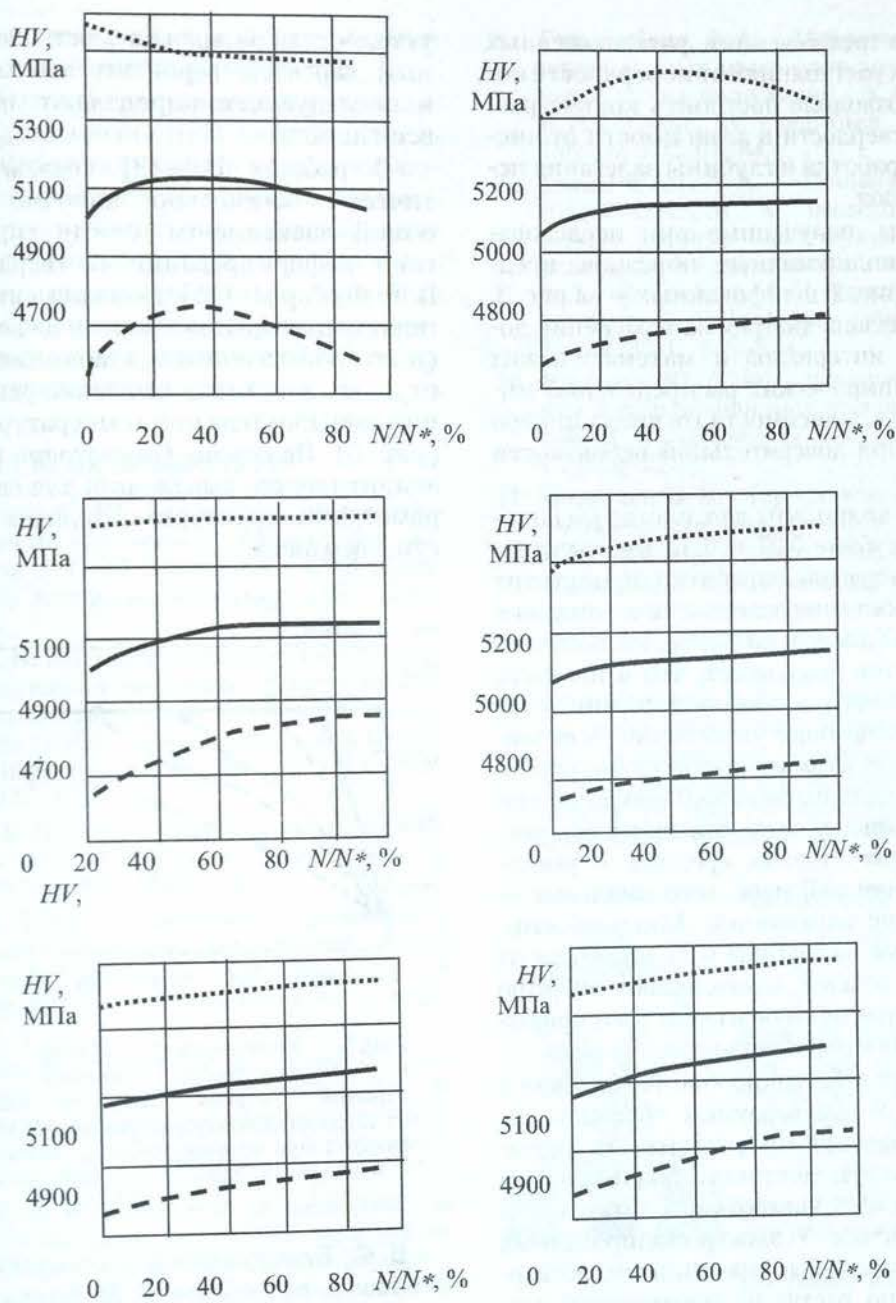


Рис. 4. Характер изменения математического ожидания (—), верхней (.....) и нижней (- - -) границ доверительного интервала распределения микротвердости (доверительная вероятность 95%) в зависимости от циклической наработки

ложемых на различном расстоянии от поверхности, в зависимости от циклической наработки, что позволило комплексно рассмотреть эту проблему и обосновать возможность использования полученных результатов.

Экспериментальное исследование распределения микротвердости производилось для стали 30ХГСНА в закаленном и низкоотпущенном состоянии после циклического нагружения переменным растяжением-сжатием образцов на испытательной машине ЦДМ-Пу-10.

Исследовались две партии образцов: после электрополирования и шлифования. Все образцы испытывались до различных степеней циклической наработки при 800 МПа; предварительно определенная средняя долговечность при этих напряжениях составляла 10^5 циклов. После заданного числа циклов образцы снимались и вырезались их центральная часть, из которой изготавливались косые шлифы по общепринятой методике. Для каждого заданного числа циклов испытывалось по два образца; у каждого твердость

измерялась в трех сечениях, расположенных на различных расстояниях от поверхности образца. Это позволило построить кривые распределения твердости в зависимости от числа циклов наработки и глубины залегания исследуемого слоя.

Результаты, полученные при исследовании электрополированных образцов, представлены на рис. 2, шлифованных — на рис. 3. На рис. 4 показана диаграмма изменения доверительных интервалов и математических ожиданий эмпирических распределений микротвердости в зависимости от числа циклов нагружения при доверительной вероятности 95 %.

На рис. 4 видно, что для слоев, расположенных на глубине 0,27 и 0,37 мм, с увеличением циклической наработки происходит стабильный рост микротвердости и снижение ее рассеяния (дисперсии). Анализ полученных результатов показывает, что в процессе циклического нагружения накопление энергии и соответствующее упрочнение, в основном, происходит в самых «слабых» микрообъемах, обладающих наименьшей микротвердостью. Минимальные значения твердости увеличиваются значительно, средние — увеличиваются в меньшей мере, максимальные — практически не изменяются. Микрообъемы, расположенные на глубине 0,27 и 0,37 мм от поверхности деталей, накапливают энергию одинаково, характеризуясь сходными кривыми накопления микротвердости.

Иначе ведут себя микрообъемы, близкие к поверхности. У шлифованных образцов минимальные значения микротвердости вначале быстро растут, достигая максимального значения при 40% наработки, а затем начинают уменьшаться. У электрополированных образцов минимальные значения микротвердости медленно растут на протяжении всего исследованного периода, в то время как максимальные и средние значения начинают снижаться после 55% наработки. По всей видимости, эти явления являются следствием воздействия поверхности. Здесь будет сказываться и шероховатость поверхности, и возможность высвобождения через поверхность потока энергии, и ряд других факторов.

На основании проведенных исследований можно также предположить, что накопление энергии при циклическом нагружении происходит в первую очередь в микрообъемах, имеющих минимальную твердость (наиболее «слабых»), поскольку их упрочнение и вызывает уменьшение дисперсии и, поскольку

усталостная повреждаемость носит локальный характер, вероятно, эти микрообъемы в последующем определяют долговечность всей детали.

В работах [10–13] показано и теоретически обосновано наличие корреляционной зависимости между скрытой энергией деформирования и твердостью. Так, В. В. Федоров [11] экспериментально установил, что скрытая энергия деформирования (в его обозначении u_e) монотонно возрастает до величины u_{e*} , численно равной энтальпии твердого тела при температуре плавления (рис. 5). Получены (достаточно громоздкие) аналитические выражения для связи u_e с параметрами структуры материала и, в частности, твердостью.

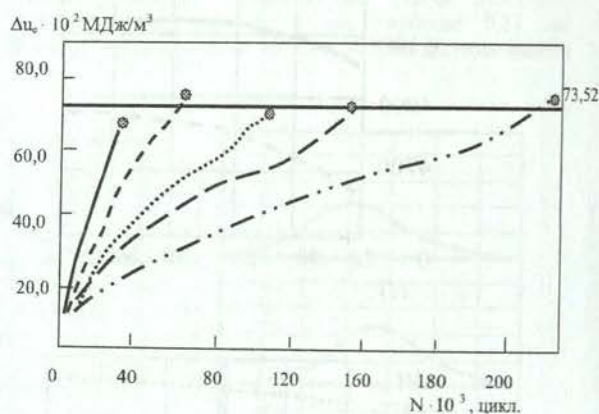


Рис. 5. Кинетические кривые изменения в деформируемых объемах плотности скрытой энергии Δu_e в зависимости от числа циклов деформирования N для стали 45 (отжиг) при напряжениях σ_a , МПа: — — — 253, - - - - - 248, ... — 239, — — — 231, -... — 225 [11]

В. Ф. Безъязычный с сотрудниками [13], ссылаясь на работы Л. М. Клербро и Мак Лина, пишет, что скрытая энергия деформации практически полностью представляет собой энергию образовавшихся после пластической деформации дислокаций. Приводится соответствующая зависимость:

$$W = QGb^2V\Lambda,$$

где W — накопленная энергия, Дж; G — модуль сдвига, П/м^2 ; b — вектор Бюргерса, м; Λ — плотность дислокаций; V — объем деформированной области, м^3 ; Q — коэффициент пропорциональности ($Q = 0,5 \dots 1$).

С учетом наличия прямо пропорциональной связи напряжений течения σ_m и плотности дислокаций Λ , с одной стороны, и, с другой — связи σ_m с твердостью HV, авторы [13]

делают вывод о возможности оценки скрытой энергии деформирования по твердости.

Таким образом, экспериментально показано, что в подповерхностной зоне твердость металла по мере циклической наработки монотонно увеличивается. Это хорошо согласуется с характером изменения скрытой энергии деформирования u_e (рис. 5). Следовательно, метод твердости (микротвердости) может быть использован в определенных пределах и условиях для оценки степени усталостной повреждаемости металла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крамаренко, О. Ю. Применение метода микротвердости при оценке усталостного повреждения / О. Ю. Крамаренко, О. В. Куликовская // Заводская лаборатория. 1972. № 1. С. 80–85.
2. Гуца, О. И. Исследование процесса усталостного разрушения металлов методом потерь на магнитный гистерезис и вихревые токи / О. И. Гуца // Циклическая прочность металлов: сб. науч. трудов. М.: Изд-во АН СССР, 1962. С. 147–152.
3. Беляев, В. И. Исследование процесса усталости металлов / В. И. Беляев. Минск: Изд-во МВССиПО БССР, 1962, 111 с.
4. Иванова, В. С. Изменение физических свойств металлов при циклическом нагружении / В. С. Иванова, Л. К. Гордиенко // Тр. АН СССР. Ин-т металлургии, 1965. С. 156–178.
5. Троценко, В. Т. Методы исследования сопротивления металлов деформированию и разрушению при циклическом нагружении / В. Т. Троценко, Б. А. Грязнов, В. А. Стрижало [и др.]. Киев: Наукова думка, 1974. 256 с.
6. Хартмут, И. Исследование закономерностей изменения микротвердости при статическом и циклическом нагружении легких сплавов / И. Хартмут // Проблемы прочности. 1974. № 11. С. 19–23.
7. Гольденберг, А. А. Структура и рассеяние результатов испытаний на усталость алюминиевых сплавов / А. А. Гольденберг, Л. П. Екименков, Л. А. Меташоп // МиТОМ. 1975. № 5. С. 61–65.
8. Гольденберг, А. А. Микротвердость конструкционных материалов под воздействием циклических нагрузений / А. А. Гольденберг, Б. И. Олькин, А. З. Воробьев // МиТОМ. 1969. № 3. С. 61–64.
9. Гольденберг, А. А. Применение метода микротвердости к исследованию изменения свойств конструкционных материалов при циклических нагрузениях / А. А. Гольденберг, Б. И. Олькин, А. Ф. Селихов [и др.] // Заводская лаборатория. 1969. № 7. Т. 35. С. 846–849.
10. Никонов, Ю. А. Роль циклическости нагружения в разрушении материалов / Ю. А. Никонов, В. А. Степанов // ФТТ. 1974. 16, № 9. С. 2750–2752.
11. Федоров, В. В. Термодинамические аспекты прочности и разрушения твердых тел / В. В. Федоров. Ташкент: Фан, 1979. 168 с.
12. Щипачев, А. М. Термодинамическая теория прочности: прогнозирование многоциклового усталости металлов / А. М. Щипачев. Уфа: УТИС, 1998. 107 с.
13. Безъязычный, В. Ф. Исследование запасенной металлом энергии деформации при вдавливании шарового индентора / В. Ф. Безъязычный, Б. М. Драпкин, М. А. Прокофьев [и др.] // Заводская лаборатория. 2005. Т. 71, № 4. С. 32–35.

ОБ АВТОРАХ



Щипачев Андрей Михайлович, проф. каф. технол. машиностроения. Д-р техн. наук (ИПСМ РАН, 2000). Иссл. в обл. влияния модиф. верхн. слоев на усталость металлов, энерг. и синерг. теории усталостной прочности.

Пояркова Екатерина Васильевна, ст. преп. Орск. филиала Оренбургск. гос. ун-та. Иссл. в обл. материаловедения в машиностроении, остаточного ресурса сварных соединений.