

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ВЛИЯНИЯ ПРИРОДЫ МАСШТАБНОГО ЭФФЕКТА ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ НА ЭКСПЛУАТАЦИЮ И НАДЕЖНОСТЬ ИЗДЕЛИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

© 2018 г. **Е.А. Чернышов, А.Д. Романов, В.В. Мыльников**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (НГТУ)

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет (ННГАСУ)

Статья поступила в редакцию 31.10.17 г., доработана 09.03.18 г., подписана в печать 13.03.18 г.

Описывается исследование масштабного эффекта и свойств поверхностных слоев твердых тел на примере алюминиевого сплава системы Al–Mg (AMg2). Показана зависимость свойств поверхностных слоев от абсолютных размеров тел. Полученные при этом выводы могут быть распространены на результаты изучения влияния различной формы твердых тел на их поверхностные и линейно-объемные свойства. Развитие новых технологий и технологический прогресс постоянно ужесточают требования к металлоемкости технических устройств, в результате чего бывает достаточно тяжело обойти возможность появления в особо ответственных деталях усталостных борозд и трещин. В некоторых случаях они могут возникнуть на самых ранних стадиях эксплуатации, т.е. присутствуют в деталях в течение большей части их жизненного цикла. Поэтому для всесторонней оценки работоспособности и ресурса изделий необходимо иметь достоверные сведения об эволюции параметров циклической прочности и долговечности, обладать максимальной информацией о процессе накопления повреждений на всех этапах усталостного нагружения — стадиях зарождения трещин, их развития и, как следствие, разрушения конструкции. Вследствие этого необходимость совершенствования методик усталостных испытаний и выявления закономерностей разрушений является одной из актуальнейших задач технического продвижения. Установлено, что различие деформации у поверхности приводит к изменению способности к деформационному упрочнению, что влечет изменение повреждаемости поверхности и показателей прочности образцов. Подход к масштабному эффекту как явлению рассматривается с позиций различия пластической деформации поверхностных слоев образцов разных абсолютных размеров.

Ключевые слова: масштабный эффект, абсолютные размеры образцов, физико-механические свойства, предел усталости, кривая усталости, сопротивление усталости, микроструктура, полосы скольжения, повреждаемость поверхности, относительная деформация.

Чернышов Е.А. — докт. техн. наук, профессор кафедры «Металлургические технологии и оборудование» НГТУ им. Р.Е. Алексеева (603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24). E-mail: nil_st@nntu.ru.

Романов А.Д. — инженер Центра разработки специальных транспортных средств НГТУ им. Р.Е. Алексеева. E-mail: nil_st@nntu.ru.

Мыльников В.В. — канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологии строительства» ННГАСУ (603950, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65). E-mail: mrmylnikov@mail.ru.

Для цитирования: Чернышов Е.А., Романов А.Д., Мыльников В.В. Некоторые аспекты влияния природы масштабного эффекта при циклических испытаниях на эксплуатацию и надежность изделий из алюминиевых сплавов // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2018. No. 5. С. 56–65. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2018-5-56-65.

Chernyshov E.A., Romanov A.D., Mylnikov V.V.

Some aspects of influence exerted by large-scale effect nature at cyclic tests on operation and reliability of aluminum alloy products

The article describes a study into the large-scale effect and properties of surface layers of solids in case of the Al–Mg system (AMg2) aluminum alloy. It demonstrates the dependence of surface layer properties on the absolute sizes of bodies. The conclusions obtained can be extended to studying the influence of different shapes of solids on their surface and linear bulk properties. New technology development and technological advance constantly toughen metal consumption requirements of engineering devices thus making it rather difficult to avoid fatigue striations and cracks forming in critical parts. In certain cases they may form at the earliest stages of operation, i.e. parts run with cracks most of their life cycle. Therefore, comprehensive assessment of their performance and life requires reliable data on the evolution of cyclic strength and durability parameters, and maximum information on the process of damage

accumulation at all stages of fatigue loading: stages of crack origin and development leading to structural failure. Therefore, the need to improve the methods of fatigue testing and failure pattern detection is one of the most relevant problems of technical advance. It is established that the difference in deformation at a surface leads to changes in work-hardening ability that involves changes in surface damageability and strength performance of samples. An approach to the large-scale effect as a phenomenon is considered from the perspective of the difference in surface layer plastic deformation for samples of different absolute sizes.

Keywords: large-scale effect, absolute sizes of samples, physicomechanical properties, fatigue strength, fatigue curve, fatigue resistance, microstructure, sliding strips, surface damageability, relative deformation.

Chernyshov E.A. — Dr. Sci. (Tech.), prof., Department of metallurgical technologies and equipment, Nizhny Novgorod State Technical University (NNSTU) n.a. R.E. Alekseev (603950, Russia, Nizhny Novgorod, Minin str., 24). E-mail: nil_st@nntu.ru.

Romanov A.D. — engineer of the Department centre of special vehicles, NNSTU n.a. R.E. Alekseev. E-mail: nil_st@nntu.ru.

Mylnikov V.V. — Cand. Sci. (Tech.), associate prof., Department of technology of construction, Nizhny Novgorod State Architecturally Construction University (603950, Russia, Nizhny Novgorod, Ilyinskaya str., 65). E-mail: mrmynikov@mail.ru.

Citation: Chernyshov E.A., Romanov A.D., Mylnikov V.V. Nekotorye aspekty vliyaniya prirody masshtabnogo effekta pri tsiklicheskih ispytaniyakh na ekspluatatsiyu i nadezhnost' izdelii iz alyuminievykh splavov. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2018. No. 5. P. 56–65. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2018-5-56-65.

Введение

В середине XX века появились сообщения о загадочных технических катастрофах. На первый взгляд эти события ничего не объединяло — в проектировании разрушившихся конструкций участвовали совершенно разные конструкторские коллективы, строили их различные фирмы в разных местах из разного металла. Единственным общим признаком было лишь то, что все катастрофы происходили с наиболее крупными по тем временам сооружениями. В работе [1] был показан универсальный характер влияния масштабного эффекта на свойства материалов и тел на Земле в широком размерном диапазоне, от атомных до планетарных масштабов, на основе обобщения фактологического материала из различных областей науки и техники.

Авторами [2] изложены основные понятия и характеристики циклической прочности, или сопротивления усталости металлических материалов. Проанализированы различные точки зрения на природу предела выносливости, даны характеристики факторов влияния на сопротивление усталости металлических материалов.

На усталостную прочность влияют такие факторы, как концентрация напряжений; масштабный фактор; качество обработки поверхности; эксплуатационные условия; наличие поверхностного слоя, упрочненного различными технологическими методами; анизотропия прочностных свойств материала.

Под масштабным фактором понимают снижение пределов выносливости образцов или деталей с ростом их абсолютных размеров. В ГОСТ 25.504-82

указано, что падение предела выносливости конкретной детали (σ_{-1d}) по сравнению с лабораторным образцом (σ_{-1}) учитывается в расчетах при помощи коэффициента K , называемого коэффициентом снижения предела выносливости и отражающего влияние основных факторов на сопротивление усталости.

Рост размеров деталей при прочих равных условиях обуславливает снижение значений предела выносливости. Проявление масштабного эффекта связывают со следующими факторами:

1) структурно-неоднородный — подразумевает под собой повышение вероятности возникновения структурных дефектов образцов с увеличением размеров;

2) технологический — проявляется при механической обработке крупногабаритных деталей и выражается в изменении структуры и свойств поверхностного слоя в худшую сторону;

3) металлургический — возникает вследствие повышенного количества литейных дефектов, приводящих к ухудшению качества металлоизделий.

В работе [3] на основе статистического материала проведен анализ основных видов и причин разрушения конструктивных элементов из алюминиевых сплавов. В работах [4, 5] указано, что концерн «Boeing» использует двухпараметрическое распределение вероятности на основании закона Вейбулла [6–9]. При этом могут применяться различные значения параметра формы в зависимости от рассматриваемого конструктивного элемента самолета и условий его нагружения — от $\alpha = 4$ (для

самолета в целом) до $\alpha = 8$ (для критической детали при нагружении в условиях перепада давления) [5, 10, 11]. Масштабный коэффициент принимается в расчетах как значение, ниже которого лежат 63,2 % всех наблюдений. Для выбора значения масштабного коэффициента существуют различные способы, изложенные в работах [8, 9, 12].

В [13] для разработки метода прогнозирования остаточной прочности элементов авиационных конструкций применялось моделирование Монте-Карло, при этом в ряде случаев используется и логарифмически нормальное распределение [14, 15].

Постановка задачи

В современном материаловедении изучение природы усталостного разрушения материалов является одной из приоритетных задач, поскольку от сопротивления усталости металлических материалов во многом зависят прочность и долговечность конструкций и изделий, использующихся в машиностроении, авиастроении и других отраслях. Развитие новых технологий и технологический прогресс постоянно ужесточают требования к металлоемкости технических устройств. В некоторых случаях в особо ответственных деталях возможно появление усталостных борозд и трещин, причем на самых ранних стадиях эксплуатации. Для всесторонней оценки работоспособности и ресурса этих деталей необходимо иметь достоверные сведения об эволюции параметров циклической прочности и долговечности, о процессе накопления повреждений на всех стадиях усталостного нагружения — от момента зарождения трещин до их развития, приводящего к разрушению конструкции. Вследствие этого необходимость совершенствования методик усталостных испытаний и выявления закономерностей разрушений является одной из актуальнейших задач технического продвижения.

Поскольку для ряда цветных металлов кривые усталости не имеют горизонтальных участков, то база испытаний для них увеличивается до $N_6 = 10^8$ и в этом случае устанавливается предел ограниченной выносливости (σ_{-1N}).

Основным мотивом для анализа физико-механических показателей конструкционных материалов (твердых тел) служит тот факт, что на их поверхности формируются слои со свойствами, отличными от свойств глубинных слоев вещества. Гипотезы масштабного эффекта включают в себя

статистическую, энергетическую, механическую, технологическую и другие составляющие.

Статистический аспект природы масштабного эффекта основывается на представлении о присутствии в теле случайных неоднородностей. Вероятность наличия этих неоднородностей зависит от размеров тел. Статистическая природа масштабного эффекта проявляется более отчетливо при сравнении результатов испытаний образцов с диаметрами, отличающимися на порядок. Чем меньше образец, тем больший разброс экспериментальных данных наблюдается. Наряду с высокими показателями могут быть и низкие. Чем крупнее деталь, тем больше в ней дефектов и, следовательно, прочность ниже, тем более усредняются результаты по испытаниям прочности. Здесь сказывается закон больших чисел, т.е. дефектов оказывается настолько много, что добавление еще некоторого их количества не оказывает заметного влияния на свойства материала.

Энергетический аспект природы масштабного эффекта заключается в следующем. Скорость распространения трещины возрастает с увеличением размеров образцов. Влияние абсолютных размеров на прочность объясняется большим запасом упругой энергии у образцов более крупных размеров. При вязком разрушении трещина в них развивается быстрее, а значение истинного сопротивления разрыву уменьшается; при хрупком разрушении снижается величина хрупкой прочности. Это объясняется освобождением большого количества упругой энергии в крупных образцах при возникновении трещины.

Соблюдение геометрического подобия при испытаниях не сопровождается физическим подобием. След резца на малой детали приводит к меньшей концентрации напряжений, чем на большем образце, а значит, мелкая деталь будет считаться прочнее крупной. Наклепанный слой в мелких деталях, по сравнению с крупными, занимает относительно более значительную долю объема. Внутреннее напряжение первого рода больше в крупных деталях, чем в мелких. Если напряжения по сечению распределяются неравномерно (зоны концентрации, изгиб, внецентровое сжатие), то градиент напряжений в малом сечении выше, чем в большом, а это означает, что на некоторой глубине напряжения в первом случае окажутся меньше.

На глубине 1 мм напряжения в вале диаметром 250 мм будут в 6 раз больше, чем в образце диаметром 10 мм. Вследствие того, что характер рас-

предела напряжения зависит от размеров, то поведение материала модели и детали в упругопластической стадии деформации и условия их прочности должны быть совершенно различными. Отсюда можно заключить, что, для того чтобы знать, как изменяется предел усталости при переходе от образца к детали, необходимо соблюдать подобное нагружение их, чему мешает разный градиент напряжения. При равных напряжениях в поверхностном слое у образцов различных диаметров градиент напряжений будет меньше для образцов с большим диаметром.

Механическая теория, объясняющая действие масштабного эффекта при наличии градиента напряжений по сечению детали, основана на том, что деформации более нагруженного поверхностного слоя препятствует соседнее внутреннее волокно, которое испытывает упругую деформацию. Естественно, с увеличением диаметра образца уменьшается градиент напряжений, поэтому сопротивление усталости понижается.

Рассмотренные предпосылки позволяют судить о противоречивости и взаимосвязи гипотез природы масштабного эффекта. В теории основными являются статистический и энергетический факторы; в экспериментальных работах значительная роль отводится технологическому аспекту. Статистический и энергетический факторы действуют в одних условиях эксперимента совместно, в других — независимо. Статистическая теория, как наиболее разработанная, может быть использована в качестве основы для построения общей теории масштабного эффекта с включением в нее энергетической и технологической составляющих. Можно отметить по крайней мере 5 причин проявления масштабного эффекта: качество металла, градиент напряжений, неоднородность напряжений и механических свойств в микрообъемах металла (статистическая теория прочности), технология изготовления образцов, суммарное влияние циклической вязкости и размеров зерен. Наиболее правдоподобными считаются две теории масштабного эффекта — статистическая и энергетическая, которые не конкурируют между собой, а дополняют друг друга.

У предела выносливости образцов и деталей, изготовленных по одним и тем же технологиям, может наблюдаться существенный разброс значений в зависимости от характеристик цикла нагружения, также на него оказывает существенное влияние целый ряд разнообразных факторов —

как по отдельности, так и в комплексе, как в отрицательную, так и в положительную сторону. Многочисленные эксперименты, проведенные с образцами различных форм и размеров, а также практические данные эксплуатации деталей машин показывают, что предел выносливости конкретной детали в значительной степени зависит от состояния поверхности и других обстоятельств. Испытания на усталость проводят в лабораторных условиях на специально подготовленных образцах диаметром 5–10 мм, имеющих строго регламентированную форму рабочей части и шероховатость поверхности. Отсюда следует, что предел усталости настоящих деталей, произведенных из исследуемого материала и по аналогичной технологии, будет коренным образом отличаться от предела выносливости испытываемых образцов.

Контроль усталостных свойств осуществляется с помощью кривых усталости, которые должны строиться в координатах «напряжение (σ) — количество циклов (N)», при этом графики $\sigma-N$ имеют вид кривых. Шкала N очень большая, и ее стараются сжать путем применения логарифмов. Кривая в координатах $\sigma-\lg N$, а тем более координатах $\lg \sigma-\lg N$, спрямляется, но продолжает называться кривой усталости.

Основной предельной характеристикой является предел усталости (σ_{-1}), который хорошо выявляется при построении кривой усталости (рис. 1).

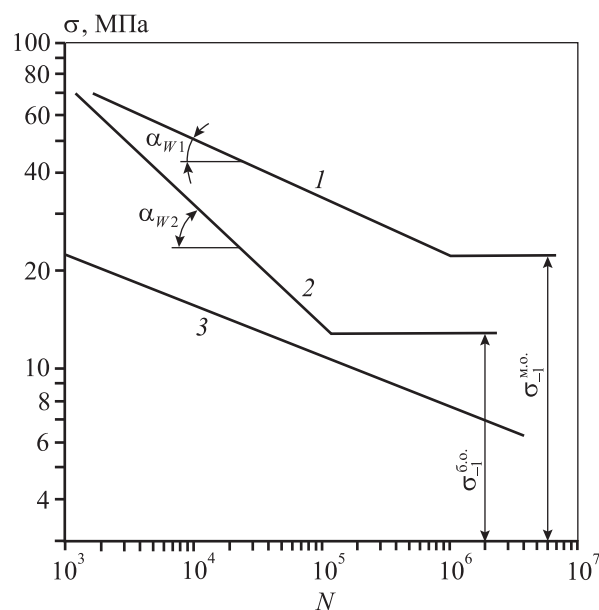


Рис. 1. Условные кривые усталости материалов

1 и 2 — соответственно для малых и больших образцов
3 — без выраженного предела усталости

Излом кривой усталости, после которого ясно обозначается предел усталости (σ_{-1}), выявляется не всегда (рис. 1, кр. 3). Чаще всего мы просто его не достигаем с использованием шкалы N .

Еще одной важной характеристикой процесса усталости материала является угол наклона к шкале N левой ветви кривой усталости (α_W), а точнее, его тангенс:

$$\operatorname{tg} \alpha_W = \frac{d \lg \sigma}{d \lg N}. \quad (1)$$

Величина $\operatorname{tg} \alpha_W$ является показателем сопротивления усталости материала. Чем меньше $\operatorname{tg} \alpha_W$, тем сильнее сопротивляется материал усталости.

На предел усталости (σ_{-1}) и на показатель сопротивления усталости ($\operatorname{tg} \alpha_W$) большое влияние оказывают различные факторы, в том числе масштабный эффект, который характеризует влияние на эти величины абсолютных размеров образцов (деталей). Так, с ростом последних величина σ_{-1} уменьшается, а показатель $\operatorname{tg} \alpha_W$ увеличивается (рис. 1, кр. 1 и 2).

На предел усталости, а следовательно, и на масштабный эффект оказывает влияние и форма образцов [16], что подтверждается их испытаниями на плоский изгиб. При плоском изгибе круглых образцов действию максимальных напряжений подвергается меньший объем, поэтому увеличение абсолютных размеров таких образцов слабо сказывается на уменьшении пределов усталости. В случае прямоугольных образцов максимальные напряжения воздействуют на больший объем, имеющий и больше вероятных дефектов, которые будут отражаться на показателях сопротивления усталости. Зависимость масштабного эффекта от абсолютных размеров прямоугольных образцов выражена сильнее, чем у круглых. У квадратных образцов она будет характеризоваться некоторыми средними значениями.

Представляет интерес связать масштабный эффект с показателем сопротивления усталости $\operatorname{tg} \alpha_W$. Далее приведены результаты испытаний материалов с определением показателя $\operatorname{tg} \alpha_W$ и анализом повреждаемости поверхности.

Методика исследований

Усталостные испытания образцов из сплава АМг2 в деформированном состоянии были проведены в соответствии с ГОСТ 25.502-79 по схеме «консольный изгиб вращающегося образца»

на оборудовании индивидуального изготовления. Объектами исследования служили образцы круглого сечения типа II с диаметром рабочей части 5 и 10 мм. Количество циклов до разрушения определялось с помощью счетчика импульсов СИ-8.

Результаты испытаний и их обсуждение

Испытания на усталость образцов сплава АМг2 показали, что с ростом абсолютных размеров образцов наклон кривых усталости увеличивается. Микроскопические исследования поверхности образцов в зоне наибольших напряжений позволили выявить наличие полос скольжения при разнотипной циклической наработке. На поверхности образцов больших размеров наблюдается более развитая конфигурация полос скольжения, и их интенсивность выше, чем у малых образцов (рис. 2). Данный факт свидетельствует о том, что поверхностный эффект в первом случае развит более сильно и напрямую связан с интенсивным поперечным скольжением расщепленных дислокаций в активном слое больших образцов. В результате исследований установлено, что чем сильнее развито поперечное скольжение расщепленных дислокаций, тем круче наклон кривых усталости к оси долговечности N .

На поверхности образцов (деталей) образуются приповерхностные слои со свойствами, отличными от свойств глубинных слоев. Глубину таких слоев обозначим символом j .

Энергетический порог повреждаемости j -х слоев (A_j) можно выразить в формулой

$$A_j = (A_j)_0 (2 - e^{-j K_{Ay} K_j}), \quad (2)$$

где $(A_j)_0$ — энергетический порог повреждаемости поверхности; K_j — параметр, связанный обратной зависимостью с толщиной поверхностного слоя j ; K_{Ay} — показатель упрочнения материала j -го слоя, возрастающий с уменьшением поперечных размеров образца, что сопровождается ростом энергетического порога повреждаемости поверхностного слоя.

Таким образом, показатели усталостной прочности ухудшаются с ростом абсолютных размеров образцов — предел усталости σ_{-1} уменьшается, а параметр сопротивления усталости $\operatorname{tg} \alpha_W$ увеличивается, т.е. процесс повреждаемости усиливается.

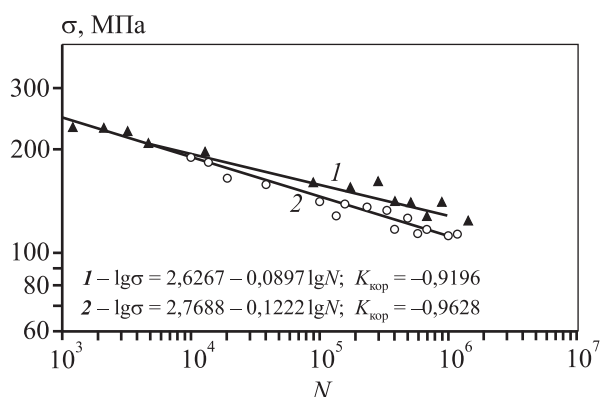


Рис. 2. Кривые усталости образцов из сплава АМг2, испытанные при изгибе вращающегося образца при температуре 20 °С
Диаметр образцов – 5 мм (1) и 10 мм (2)

Шкала N связана с пластичностью [17, 18], ее уменьшение сжимает абсциссу N , и наклон кривой усталости растет, при этом сопротивление усталости больших образцов, по сравнению с малыми, снижается. Зарождение усталостных трещин объясняется тем, что в малых образцах полосы скольжения находятся на большем расстоянии друг от друга, чем в крупных, где они расположены плотнее.

В малых образцах, как уже было сказано, поперечное скольжение развито слабее, чем в больших, т.е. затруднено. Это хорошо иллюстрируют полосы скольжения, полученные при циклическом нагружении (рис. 3). Способность к циклическому упрочнению у малых образцов выше, чем у больших, и наклоны их кривых усталости более пологие (см. рис. 2).

Анализируя кривые упрочнения, можно заметить, что с ростом поперечного сечения коэффициент упрочнения уменьшается, пластичность материала ухудшается и натурные конструкции при кратковременных нагрузках могут хрупко разрушаться. Так, деформационное упрочнение может быть следствием накопления дислокаций и дефектов другого типа непосредственно в процессе деформации. Во-вторых, деформационное упрочнение может быть результатом противодействия движению дислокаций вследствие наличия последних в исходном недеформированном металле. С одной стороны, разница в поведении малых и больших образцов объясняется тем, что у первых в удельном объеме реализуется относительно большее количество плоскостей скольжения. Объем образцов небольших размеров в более полной мере подвергается пластической деформации — иными словами, градиент пластической деформации у них от поверхности к центру мал. Деформация в них проходит с меньшим сопротивлением, что облегчает пластическую деформацию весьма тонкого поверхностного слоя. Такой механизм плохо осуществим в крупных образцах — их объем деформируется пластически в разной степени, т.е. с большей вероятностью можно найти участки или объемы, не подвергающиеся воздействию пластической деформации, что в свою очередь повышает градиент скорости пластической деформации на поверхности этих образцов после определенной задержки, большей по времени, чем у малых образцов. Лавинообразное движение дислокаций у образцов с небольшими размерами начинается раньше, чем у крупных, существенно отличаю-

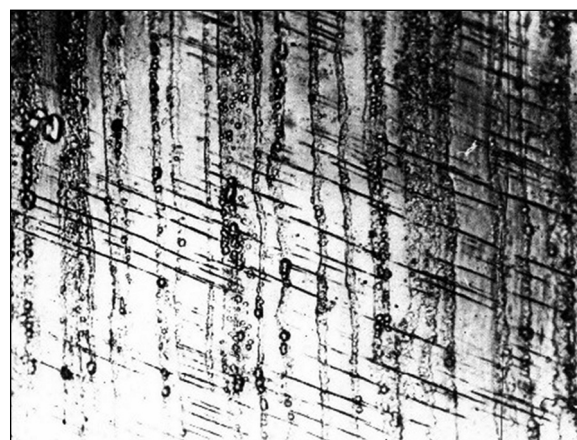
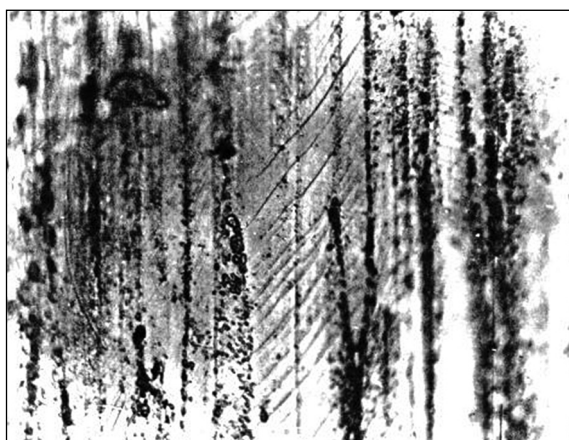


Рис. 3. Микроструктура сплава АМг2 после циклического нагружения ($N = 28\,500$)

Шлиф не протравливался

$a - d = 5$ мм, $\sigma = 170$ МПа; $б - d = 10$ мм, $\sigma = 165$ МПа

щихся геометрическим характером и плотностью распределения полос скольжения.

Повреждаемость поверхности в виде полос скольжения напрямую связана с таким показателем сопротивления усталости, как отношение приращений напряжений к соответствующим им долговечностям. Полосы скольжения являются следствием поперечного скольжения расщепленных дислокаций.

Имея экспериментальные данные в виде микроструктуры с полосами скольжения, можно подсчитать количественно повреждаемость поверхности по формуле

$$\Phi = \frac{n_{32}}{n_{31}} \cdot \frac{n_{34}}{n_{33}} \cdot \frac{n_{п2}}{n_{п1}} \cdot \frac{F_m}{F_{обр}}, \quad (3)$$

где n_{31} — количество зерен на микроструктуре; n_{32} — количество поврежденных зерен; n_{33} — разница между количествами неповрежденных и поврежденных зерен; n_{34} — количество зерен, поврежденных широкими полосами скольжения; $n_{п1}$ — общее количество полос в поврежденных зернах; $n_{п2}$ — количество широких, извилистых и прерывистых полос скольжения; F_m — площадь микроструктуры; $F_{обр}$ — площадь образца в зоне деформации.

С увеличением количества циклов показатели n_{31} , F_m и $F_{обр}$ оказываются неизменными, а пять других (n_{32} , n_{33} , $n_{п1}$, $n_{п2}$, n_{34}) — возрастают. Более сильное влияние на величину Φ , приводящее к катастрофической трещине, оказывают параметры n_{33} , n_{34} и $n_{п2}$, т.е. в каждой паре отношений в числителе поставлены превалирующие факторы. Если число поврежденных зерен равно нулю, то n_{32} , n_{33} , n_{34} , $n_{п1}$ и $n_{п2}$ отсутствуют и $\Phi = 0$, что справедливо для исходной (неповрежденной) структуры.

Формула (3) выведена для материалов с выраженной зеренной структурой. В первых трех отношениях не случайно фигурируют только безразмерные численные значения — такие, как числа зерен и полос скольжения. Как правило, для подобных материалов число полос скольжения практически не увеличивается после достижения определенной наработки. Эти полосы лишь разрыхляются. Площадь повреждения возрастает при сохранении практически неизменным числа полос, что и учитывается с помощью формулы (4). У высокопрочных материалов и материалов, подвергнутых упрочняющему воздействию, зеренной структуры мы чаще всего не наблюдаем. В этих

случаях можно исследовать повреждаемость активного слоя на нетравленном шлифе. Формула для подсчета повреждаемости в этом случае будет иметь следующий вид:

$$\Phi = \frac{n_{п2}}{n_{п1}} \cdot \frac{F_{повр}}{F_{з.п}} \cdot \frac{F_m}{F_{обр}}, \quad (4)$$

где $n_{п1}$, $n_{п2}$, F_m , $F_{обр}$ — те же, что в формуле (3); $F_{повр}$ — площадь повреждения; $F_{з.п}$ — площадь, охваченная повреждениями.

Параметр сопротивления материала поверхностных слоев прохождению физических процессов упрочнения-разупрочнения в этих слоях (K_{Ay}) уменьшается с ростом абсолютных размеров образцов. Изменение названных параметров приводит к изменению повреждаемости (Φ) материала поверхностных слоев. Представляется возможным проанализировать изменения величин отношений n_{32}/n_{31} , n_{34}/n_{33} , $n_{п2}/n_{п1}$, составляющих основу формул для вычисления Φ .

Число зерен на микроструктуре n_{31} практически не зависит от масштабного эффекта в отличие от количества поврежденных зерен n_{32} . Изменение способности материала к упрочнению при изменении абсолютных размеров образцов, выражающееся в изменении параметра K_{Ay} , приводит к возможности изменения энергетического порога повреждаемости, что свидетельствует об изменении повреждаемости поверхности.

Увеличение размеров образцов, как уже упоминалось, обуславливает уменьшение толщины приповерхностного слоя (j) и коэффициента упрочнения его материала (K_{Ay}), что свидетельствует о возможности облегчения повреждения материала, т.е. о повышении вероятности зарождения повреждений, а точнее, о росте числа n_{32} . Отношение n_{32}/n_{31} возрастает при росте размеров деталей, что вносит вклад в увеличение повреждаемости Φ .

Разница n_{33} между числами неповрежденных и поврежденных зерен по всей площади зависит от масштабного эффекта, т.е. n_{33} увеличивается с ростом абсолютных размеров деталей, так как способность к упрочнению, отображаемая в параметре K_{Ay} , при этом не снижается. Однако само по себе число n_{33} при d_1 не слишком отличается от n_{33} при d_2 , если $d_1 > d_2$. Более заметно изменяется параметр n_{34} — количество зерен, поврежденных широкими полосами скольжения, которое чувствительно к изменению способности материала к упрочнению. С ростом абсолютных размеров эта способность снижается, а значит, повышается ве-

Показатели сопротивления усталости и деформационного упрочнения при изменении абсолютных размеров образцов из сплава АМг2

Показатель сопротивления усталости $\text{tg}\alpha_W$	Повреждаемость поверхности материалов Φ	Действующее напряжение σ , МПа	Число циклов N	Частота циклов нагружения ω , Гц	Поперечные размеры образцов d , мм
0,0897	0,00298	170	28500	46,7	5
0,1222	0,0046	165	28500	46,7	10
0,0897	0,00276	170	40000	46,7	5
0,1222	0,0033	165	40000	46,7	10

роятность повреждения, что в свою очередь приводит к увеличению n_{34} . Отношение n_{34}/n_{33} возрастает с ростом абсолютных размеров деталей, а значит, увеличивается повреждаемость Φ .

Общее число полос скольжения на микроструктуре $n_{п1}$ реагирует на изменение способности материала j -го слоя к упрочнению-разупрочнению, происходящему при изменении абсолютных размеров образцов (деталей), и тем сильнее, чем больше d . Однако более сильное влияние масштабный эффект оказывает на величину $n_{п2}$. Отношение $n_{п2}/n_{п1}$ растёт, и Φ увеличивается.

Таким образом, с ростом d повреждаемость повышается. Величина Φ определяет показатели сопротивления усталости $\text{tg}\alpha_W$ и сопротивления статическому нагружению $\text{tg}\alpha_{Ky}$: увеличение Φ с ростом d приводит к ухудшению этих показателей ($\text{tg}\alpha_W$ увеличивается, а $\text{tg}\alpha_{Ky}$, наоборот, уменьшается (см. таблицу).

Приведенные в таблице данные позволяют построить новые зависимости, связывающие параметр $\text{tg}\alpha_W$ с повреждаемостью поверхности Φ , а также с коэффициентом деформационного упрочнения $\text{tg}\alpha_{Ky}$ и пределом выносливости с учетом масштабного эффекта. Учитываются и другие факторы. Наличие показателя сопротивления усталости $\text{tg}\alpha_W$ позволяет определить предел выносливости либо по формуле

$$\sigma_{-1} = A \frac{(\text{tg}\alpha_W)^2 + 1}{\text{tg}\alpha_W}, \quad (5)$$

либо по кривой усталости, что позволяет построить прогнозируемую кривую усталости.

Зависимость вида $\text{tg}\alpha_W = f(\Phi)$ достаточно сложна и имеет прежде всего теоретическое значение. Однако можно определить повреждаемость Φ на масштабном образце, модели или самой детали, если есть такая возможность при учете конструктив-

ных ее особенностей. Наличие повреждаемости Φ позволяет определить показатель $\text{tg}\alpha_{Ky}$ и спрогнозировать кривую усталости натурной детали.

При этом необходимо отметить, что формирование наноструктурированных поверхностных слоев методами интенсивной поверхностной деформации приводит к повышению пределов усталости алюминиевых и магниевых сплавов в малоцикловой области на 10–15 % по сравнению со значениями для материалов в состоянии поставки. В работах [19, 20] показано, что эффект увеличения циклической долговечности при формировании поверхностных структурированных слоев в этих сплавах подобен эффекту от создания объемной субмикроструктурной структуры методами интенсивной пластической деформации. Анализ макростроения и микростроения усталостных изломов дает ценную информацию о закономерностях образования усталостных трещин в легких сплавах и влиянии структурированных поверхностных слоев на усталостное разрушение.

Заключение

Установлено, что у поверхности сплава АМг2 происходит изменение способности к деформационному упрочнению, что обуславливает изменение повреждаемости поверхности образцов.

С ростом абсолютных размеров наблюдается непрерывное снижение усталостной прочности. При этом всякое упрочняющее воздействие на металл приводит к более сильному проявлению масштабного эффекта. Более прочные материалы обладают более сильной зависимостью усталостной прочности от поперечных размеров детали.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (уникальный идентификатор проекта RFMEFI57171X0268).

Литература

1. *Сухонос С.И.* Масштабный эффект — неразгаданная угроза. М.: Новый Центр, 2001.
2. *Терентьев В.Ф., Оксогов А.А.* Циклическая прочность металлических материалов: Учеб. пос. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001.
3. *Бычков А.С., Игнатович С.Р., Моляр А.Г.* Основные виды и причины разрушения конструктивных элементов из алюминиевых сплавов отечественных воздушных судов транспортной категории // Открытые информ. и компьют. интегрир. технологии. 2015. No. 70. С. 135—151.
4. *Каран Е.В.* Прогнозирование ресурса авиационных конструкций с многоочаговым повреждением: Дис. ... канд. техн. наук. Киев: Нац. авиац. ун-т, 2016. Режим доступа: <http://er.nau.edu.ua:8080/handle/NAU/17702>.
5. Recommendations for regulatory action to prevent widespread fatigue damage in the commercial airplane fleet: a report of the AAWG (Final report) [Электр. ресурс]. Airworthiness Assurance Working Group, 1999. Режим доступа: http://www.faa.gov/aircraft/air_cert/design_approvals/transport/aging_aircraft/media/ARAC_WFDFinalReport399A.pdf.
6. *Yang J.-N., Trapp W.J.* Reliability analysis of aircraft structures under random loading and periodic inspection // Amer. Inst. Aeron. Astron. (AIAA) J. 1974. Vol. 12. P. 1623—1630.
7. *Deodatis G., Fujimoto Y., Ito S., Spencer J., Itagaki H.* Non-periodic inspection by Bayesian method I // Probabil. Eng. Mech. 1992. Vol. 7. P. 191—204.
8. *Ito S., Deodatis G., Fujimoto Y., Asada H., Shinozuka M.* Periodic inspection by bayesian method ii: structures with elements subjected to different stress levels // Probabil. Eng. Mech. 1992. Vol. 7. P. 205—215.
9. *Deodatis G., Asada H., Ito S.* Reliability of aircraft structures under non-periodic inspections: A Bayesian approach // Eng. Fract. Mech. 1996. Vol. 53. No. 5. P. 789—805.
10. *Rambalacos A., Deodatis G.* Non-periodic inspection of aging aircraft structures // Proc. 9th Joint FAA/DoD/NASA Conf. on aging aircraft (Atlanta, USA, GA, March 6—9, 2006). 2006. P. 1—18.
11. *Yang J.N., Manning S.D., Garver W.R.* Durability methods development [Электр. ресурс] (Technical report AFFDL-TR-79-3118). Vol. V: Durability analysis methodology development. Structural and Design Department, GDC, Fort Worth, Texas, US, 1979. Режим доступа: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a116395.pdf>.
12. *Goranson U.G.* Damage tolerance. Facts and fiction [Электр. ресурс] // Keynote Presentation in Int. Conf. on damage tolerance of aircraft structure (Delft, Netherlands, 25 Sept. 2007). 2007. Режим доступа: http://dtas2007.fyper.com/userfiles/file/Paper%2011_Goranson.pdf.
13. *Cavallini G., Lazzeri R.* Probabilistic approach to fatigue risk assessment in aerospace components // Eng. Fract. Mech. 2007. Vol. 74. No. 18. P. 2964—2970.
14. *Kim J.H., Zi G., Van S.-N., Jeong M.C., Kong J.S., Kim M.* Fatigue life prediction of multiple site damage based on probabilistic equivalent initial flaw model // Struct. Eng. Mech. 2011. Vol. 38. No. 4. P. 443—457.
15. *Tong Y.C.* Literature review on aircraft structural risk and reliability analysis (Technical report DSTO — TR-1110). Aeronautical and Maritime Research Laboratory, 2001.
16. *Иванова В.С., Терентьев В.Ф.* Природа усталости металлов. М.: Металлургия, 1975.
17. *Шетулов Д.И.* Эффект «стесненности» деформации металлических образцов с увеличением их абсолютных размеров // Металлы. 1993. No. 4. С. 212—216.
18. *Шетулов Д.И., Андреев В.В., Кравченко В.Н., Кисляков Ю.П.* Взаимосвязь параметров сопротивления усталости и статической деформации как основа для прогнозирования прочности и долговечности металлических конструкционных материалов // Тр. Междунар. форума по проблемам науки, техники и образования. М.: АНЗ, 2001. С. 28—29.
19. *Гегузин Я.Е.* Физика спекания. М.: Наука, 1967.
20. *Оксогов А.А., Скрипняк В.А., Окунева Т.* Структурная адаптация поликристаллических материалов к внешним воздействиям // Перспективные материалы и технологии для ракетно-космической техники / Под ред. А.А. Берлина, И.Г. Ассовского. М.: ТОРЭС ПРЕСС, 2007. Т. 3. С. 101—109.

References

1. *Sukhonos S.I.* Masshtabnyi effekt — nerazgadannaya ugroza [Large-scale effect — unsolved threat]. Moscow: Novyi Tsentr, 2001.
2. *Terent'ev V.F., Oksogov A.A.* Tsiklicheskaya prochnost' metallicheskih materialov [Cyclic durability of metal materials]. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2001.
3. *Bychkov A.S., Ignatovich S.R., Molyar A.G.* Osnovnye vidy i prichiny razrusheniya konstruktivnykh elementov iz alyuminievykh splavov otechestvennykh vozduzhnykh sudov transportnoi kategorii [Main types and causes of destruction of structural elements from aluminum alloys of domestic aircrafts of transport category].

- Otkrytye informatsionnye i komp'yuternye integrirovannye tekhnologii*. 2015. No. 70. P. 135—151.
4. *Karan E.V.* Prognozirovanie resursa aviatsionnykh konstruksii s mnogoochagovym povrezhdeniem [Forecasting the resource of aircraft structures with multifocal damage]: The dissertation of Cand. Sci. (Tech.). Kiev: Natsional'nyi aviatsionnyi universitet, 2016. <http://er.nau.edu.ua:8080/handle/NAU/17702>.
 5. Recommendations for regulatory action to prevent widespread fatigue damage in the commercial airplane fleet: a report of the AAWG (Final report). Airworthiness Assurance Working Group, 1999. http://www.faa.gov/aircraft/air_cert/design_approvals/transport/aging_aircraft/media/ARAC_WFDFinalReport399A.pdf.
 6. *Yang J.-N., Trapp W.J.* Reliability analysis of aircraft structures under random loading and periodic inspection. *Amer. Inst. Aeron. Astron. (AIAA) J.* 1974. Vol. 12. P. 1623—1630.
 7. *Deodatis G., Fujimoto Y., Ito S., Spencer J., Itagaki H.* Non-periodic inspection by Bayesian method I. *Probabil. Eng. Mech.* 1992. Vol. 7. P. 191—204.
 8. *Ito S., Deodatis G., Fujimoto Y., Asada H., Shinozuka M.* Periodic inspection by bayesian method ii: structures with elements subjected to different stress levels. *Probabil. Eng. Mech.* 1992. Vol. 7. P. 205—215.
 9. *Deodatis G., Asada H., Ito S.* Reliability of aircraft structures under non-periodic inspections: A Bayesian approach. *Eng. Fract. Mech.* 1996. Vol. 53. No. 5. P. 789—805.
 10. *Rambalakos A., Deodatis G.* Non-periodic inspection of aging aircraft structures. In: *Proc. 9th Joint FAA/DoD/NASA Conf. on aging aircraft* (Atlanta, USA, GA, March 6—9, 2006). 2006. P. 1—18.
 11. *Yang J.N., Manning S.D., Garver W.R.* Durability methods development (Technical report AFFDL-TR-79-3118). Vol. V: Durability analysis methodology development. Structural and Design Department, GDC, Fort Worth, Texas, US, 1979. <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a116395.pdf>.
 12. *Goranson U.G.* Damage tolerance. Facts and fiction. In: *Keynote presentation in Int. Conf. on damage tolerance of aircraft structure* (Delft, Netherlands, 25 Sept. 2007). 2007. Режим доступа: http://dtas2007.fyper.com/user-files/file/Paper%2011_Goranson.pdf.
 13. *Cavallini G., Lazzeri R.* Probabilistic approach to fatigue risk assessment in aerospace components. *Eng. Fract. Mech.* 2007. Vol. 74. No. 18. P. 2964—2970.
 14. *Kim J.H., Zi G., Van S.-N., Jeong M.C., Kong J.S., Kim M.* Fatigue life prediction of multiple site damage based on probabilistic equivalent initial flaw model. *Struct. Eng. Mech.* 2011. Vol. 38. No. 4. P. 443—457.
 15. *Tong Y.C.* Literature review on aircraft structural risk and reliability analysis (Technical report DSTO — TR-1110). Aeronautical and Maritime Research Laboratory, 2001.
 16. *Ivanova V.S., Terent'ev V.F.* Priroda ustalosti metallov [Nature of fatigue of metals]. Moscow: Metallurgiya, 1975.
 17. *Shetulov D.I.* Effekt «stesnennosti» deformatsii metallicheskih obraztsov s uvelicheniem ikh absolyutnykh razmerov [Effect of «constraint» of deformation of metal samples with increase in their absolute sizes]. *Metally.* 1993. No. 4. P. 212—216.
 18. *Shetulov D.I., Andreev V.V., Kravchenko V.N., Kislyakov Yu.P.* Vzaimosvyaz' parametrov soprotivleniya ustalosti i staticheskoi deformatsii kak osnova dlya prognozirovaniya prochnosti i dolgovechnosti metallicheskih konstruksionnykh materialov [Interrelation of parameters of resistance of fatigue and static deformation as basis for forecasting of durability and durability of metal constructional materials]. In: *Trudy mezhdunarodnogo foruma po problemam nauki, tekhniki i obrazovaniya* [Proceedings of the International forum on science, technology and education]. Moscow: ANZ, 2001. P. 28—29.
 19. *Geguzin Ya.E.* Fizika spekaniiya [Physics of agglomeration]. Moscow: Nauka, 1967.
 20. *Oksogoev A.A., Skripnyak V.A., Okuneva T.* Strukturnaya adaptatsiya polikristallicheskih materialov k vneshnim vozdetsviyam [Structural adaptation of polycrystalline materials for external influences]. In: *Perspektivnye materialy i tekhnologii dlya raketno-kosmicheskoi tekhniki [Erspective materials and technologies for the missile and space equipment]*. Eds. A.A. Berlin, I.G. Assovskii. Moscow: TORUS PRESS, 2007. Vol. 3. P. 101—109.