

УДК 620.1783:620.194.8

В.Г. Пачурин¹, В.В. Галкин², Г.В. Пачурин², А.А. Дербенев³**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ НА ЦИКЛИЧЕСКУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ДЕФОРМИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ**ООО «Нау стандарт»¹,Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²,ОАО «НАЗ» Сокол»³

В производственных условиях применение схемы технологического проектирования изготовления металлоизделий методами обработки давлением с обозначением связи между деформированным состоянием материала и формируемой им структурой с учетом циклической долговечности сдерживается недостаточностью средств информационной поддержки. Зависимости сопротивления усталости материала от условий технологического передела методами пластического деформирования весьма ограничены. В работе предложена схема оценки циклической долговечности пластически деформированного металла изделий, основанная на совершенствовании автоматизированного метода микроструктурного анализа размера зерна и совершенствования структуры технологического проектирования и информационного обеспечения для оценки усталостных характеристик материала. Результаты исследования могут быть использованы при расчетном сопровождении технологий проектирования, совершенствовании информационной базы в виде разработки инженерных приложений для конструкторско-технологического проектирования и производства листовых гофрированных обшивок, раскатанных заготовок с клиновидной поверхностью.

Ключевые слова: технологическое проектирование, листовая гофрированная панель, рессорный лист, микроструктура, деформация, циклическая долговечность.

Введение

Одной из основных задач структурной перестройки отечественной промышленности является ускоренное формирование национальной технологической базы по обеспечению конкурентоспособной продукции на внутреннем и внешнем рынках. Наиболее распространенным видом эксплуатационных разрушений инженерных конструкций является усталостное разрушение [1,2]. Поэтому вопросы работоспособности деталей, узлов, машин и технических устройств в целом являются приоритетными направлениями современной науки и важнейшей задачей промышленности.

В настоящее время в производстве используются металлические изделия, получаемые различными способами обработки. Практически все прочностные металлические детали машин изготавливаются из заготовок, полученных после обработки давлением. Условия эксплуатации изделий отличаются величиной, характером нагрузки, температурными условиями и средой, которые неоднозначно влияют на процессы упрочнения металла и его эксплуатационные свойства [3, 4, 5]. Вопросы усталостного разрушения металлов и сплавов подробно изложены в работах В.Ф. Терентьева, В.С. Ивановой.

Одним из основных факторов, влияющих на сопротивление усталости, является структурное состояние материала [6, 7, 8]. В число параметров структурного состояния входят размер зерна, тип структуры, состояние приповерхностного слоя, остаточные напряжения на уровнях суб-, микро-, макроструктуры и размеры изделия. На указанные параметры могут влиять технологические условия процесса изготовления изделия [9, 10]. Проблемы долговечности получаемых изделий и ее зависимость от предварительной деформации обозначены в работах Г.П. Гусяковой, Г.В. Пачурина, А.Б. Елькина, А.П. Гущина и других исследователей.

Следует указать на сложности, связанные с оценкой циклической долговечности металлоизделий, получаемых методами обработки давлением. Данная проблема является комплексной, затрагивающей кроме вопросов усталостной прочности проблемы теории пластично-

сти. Необходим анализ напряженно-деформированного состояния металла изготавливаемого изделия, которое изменяет его структурное состояние в результате технологического передела. Среди ученых, внесших значительный вклад в изучение данных явлений, необходимо назвать С.И. Губкина, М.В. Сторожева, А.А. Илюшина, В.П. Северденко, Г.А. Смирнова-Аляева и др.

В системе технологической подготовки производства изделий используются нормативные документы, в частности стандарт ГОСТ Р 50995.0.1-96, который определяет содержание и структуру технологического обеспечения (ТО). Она основана на целевом комплексном охвате технологических работ, в которые как подсистема входит технологическое обеспечение проектирования. В настоящее время отсутствует единая схема технологической подготовки проектирования изготовления металлоизделий методами обработки давлением с позиции прогнозирования циклической долговечности, в которой была бы обозначена связь между деформируемым состоянием материала и формируемой им структурой, от которой зависит сопротивление усталости. При этом можно отметить недостаточность эффективности средств информационной поддержки процесса конструкторско-технологического проектирования, которая касается с одной стороны процессов обработки давлением, с другой - циклической долговечности материала, обусловленной технологическим переделом. Одно и то же металлоизделие, как правило, можно изготовить различными технологическими процессами, которые отличаются температурно-скоростными условиями деформации и схемой деформирования. При этом в объеме получаемых поковок и листовых, заготовок формируется различная структура, отличающаяся величиной зерна, морфологией структуры, значением остаточных напряжений разных уровней. В работах В.Ф. Терентьева [11] прямо указывается, что главным при усталостном разрушении являются не осредненные характеристики сопротивления деформированию, а их величина в конкретных местах и элементах изделий, отвечающих за их эксплуатационную долговечность. Для взаимосвязи локальных деформированных объемов со структурным их изменением необходима количественная их оценка, автоматизация которой является одной из задач изложенной проблемы. В настоящее время основным направлением ее решения является компьютерное материаловедение.

Это подтверждает актуальность исследования по совершенствованию информационного; обеспечения технологического проектирования изготовления пластически деформированных металлических изделий с заданными усталостными характеристиками.

Методика

В качестве объектов исследований выбраны изделия, эксплуатируемые в условиях циклической долговечности: листовые гофрированные панели из сплава ЭИ 878 (12Х17Г9АН4) и рессорный лист с клиновидным профилем из стали 50ХГФА.

Материал панелей формовался по двум технологиям: на форм-блоке эластичной средой на гидропрессе в холодном состоянии и в жестких штампах на молоте с нагревом. Для определения напряженно-деформированного состояния был применен метод сеток. По местам замеров деформированной сетки рассчитаны характеристики деформированного состояния по конструктивным элементам - рифтам и построены графики изменения интенсивности итоговой деформации и толщины в зонах рифтов по поперечному и продольному сечениям [9, 12].

Структурно-механические и усталостные испытания проводились на образцах, которые вырезались из зоны рифтов по их гребням и впадинам. На основании обработки данных механических испытаний построены зависимости упрочнения сплава Ж 878 панелей, изготовленных на прессе и молоте.

Образцы из стали 50ХГФА вырезались методом проволочной электроэрозионной обработки из раскатанных на клин и термически обработанных листов [13]. Оценка деформированного состояния металла проводилось с помощью методов: определения изменения расстояний между вертикальными рисками (метод линий Холленберга), нанесенными на боковой поверхности прокатываемой полосы; замера деформации прокатанных винтов.

Экспериментальные исследования структуры включали: макро- и микроструктурный анализ с использованием оптической микроскопии на микроскопах МБС-10, МИМ-7; фрактографический анализ изломов на растровом электронном микроскопе типа SAMSUNG SEM 515 с применением цифрового фотографирования; рентгеноструктурный анализ на установке ДРОН-2; измерение релаксации напряжений на автоматизированной установке. Механические испытания включали стандартные испытания на растяжение согласно ГОСТ 1497 на испытательной машине УМЭ-10Г и измерение твердости по Роквеллу (ТК-2), Викерсу (Zwick) и микротвердости. Испытания на усталость, проводились на образцах с использованием двухпозиционной установки [14] и на натуральных изделиях по стандартным и отраслевым методикам.

Результаты исследования

Листовая гофрированная панель из сплава ЭИ 878 (12Х17Г9АН4).

Структура стали сплава ЭИ 878 представлена на рис. 1.

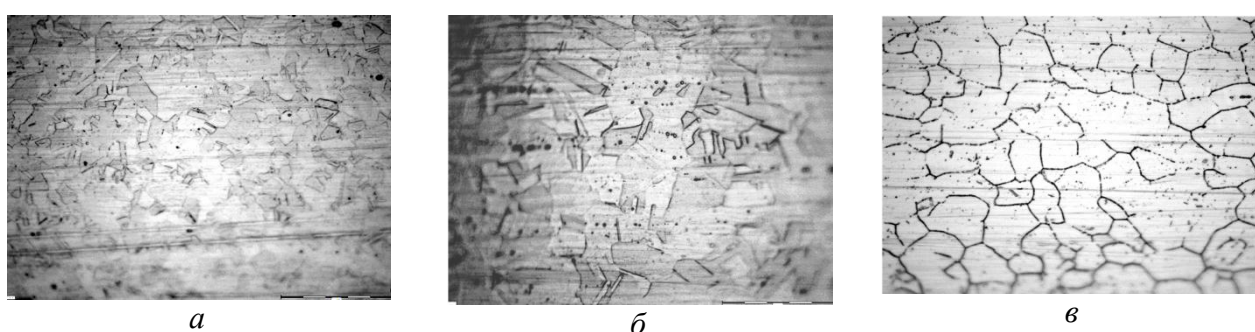


Рис. 1. Микроструктура сплава ЭИ 878:

а – состояние поставки, *б, в* – листовые гофрированные панели, изготовленные на прессе и на молоте (соответственно по фото) с утонением 15%

По результатам исследования деформированного состояния материала формованных листовых гофрированных панелей были получены следующие зависимости утонения в поперечном сечении синусоидального рифта в зависимости от схемы штамповки, определяемой конструкцией инструмента. При штамповке на прессе на форм-блоке эластичной средой степень деформации по толщине материала в поперечном сечении находится в интервале 10-15% с наибольшим утонением по впадине рифта, а при штамповке на молоте в жестком штампе, соответственно 10-30% с наибольшим утонением по гребню рифта. Причиной этого является принципиальное отличие схем штамповки. При штамповке на прессе по ходу процесса первоначально происходит защемление заготовки эластичной средой по гребням матрицы без ее защемления по периметру. Это обеспечивает возможность подтягивания в зону формовки фланца заготовки. При этом штамповка на прессе имеет техническую возможность постепенного увеличения давления эластичной среды в контейнере с большой равномерностью прикладываемых сил по поверхности заготовки.

При штамповке на молоте элементы жесткости получают постепенно за несколько переходов, при этом верхний инструмент своими гребнями концентрированно воздействует на заготовку, лежащую на нижнем инструменте. С целью предотвращения возникновения складок в формируемой заготовке на нижнем инструменте защемление заготовки по его периметру выполняются на первом переходе на технологических порогах. Многопереходность и постепенность процесса деформации обеспечиваются за счет стопки технологических прокладок, которые убираются на каждом последующем переходе. Полученные результаты объясняют необходимость штамповки гофрированных панелей из сплава ЭИ 878 на молотах с нагревом в действующем производстве (инструкция ВИАМ). Причиной является значительная неравномерность утонения и недостаточная пластичность материала при холодной обработке.

Рессорный лист с продольным клиновым профилем из стали 50ХГФА.

Микроструктура по всей длине рессорного листа состоит из сорбита и феррита (рис. 2). По длине прокатного листа определяется величина зерна.

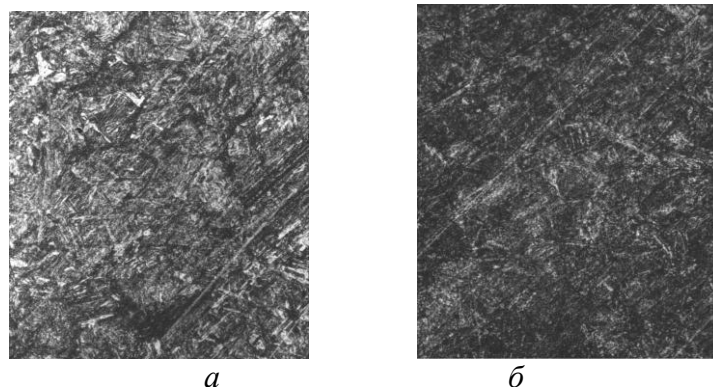


Рис. 2. Микроструктура исследуемых зон рессорного листа:
a – центральное отверстие;
б – сечение со степенью обжатия 40%

По результатам механических испытаний рассчитаны прочностные характеристики и показатели пластичности прокатанного и термически обработанного материала в зависимости от степени раскатки. Результаты испытаний на усталость представлены зависимостями циклической долговечности слоев раскатанной заготовки рессорного листа для двух степеней обжатия (рис. 3).

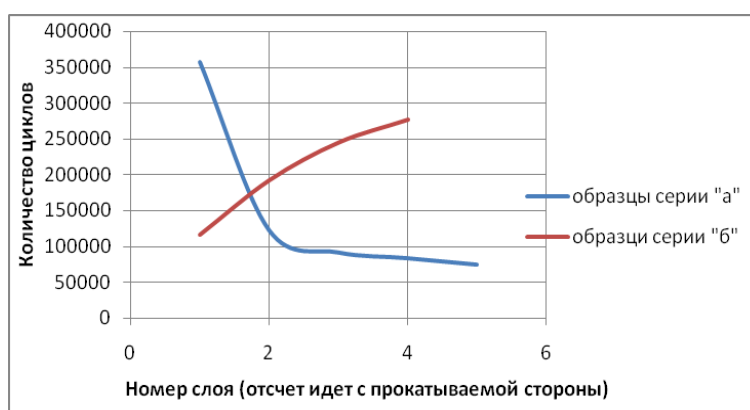


Рис. 3. Зависимость циклической долговечности слоев раскатанного листа из стали 50ХГФА со степенями обжатия:
a – 40%; *б* – 23 %

Анализ деформированного состояния металла в объеме раскатанной заготовки рессорного листа показал его неоднородность по слоям и по длине раскатки. Данный факт означает, что при разных степенях обжатия слои имеют различную степень деформации и определенную закономерность изменения: с начала прокатки и до степени обжатия $\approx 20\%$ наибольшую интенсивность деформации по удлинению имеют слои контактирующие с инструментом - валком, далее она смещается на слои, контактирующие с неподвижной плитой прокатного стана. При дальнейшем увеличении она вновь начинает смещаться к прокатываемой поверхности. Неоднородность деформированного состояния также подтверждается механическими характеристиками материала по поперечным сечениям прокатанной заготовки. Неравномерность деформации определяется особенностями строения очага, просматриваемого при математическом моделировании. При малых обжатиях до 4% зона локализации

представляет собой сомкнутый вершинами односторонний конус со стороны активного инструмента - валка. При степени обжатия 23% зона локализации также представляет односторонний конус, только его вершина соответствует поверхности заготовки, контактирующей с неподвижной плитой.

В дальнейшем геометрия зоны локализации в виде конуса начинает размываться и принимает сложную форму. Экспериментальное подтверждение данного факта было выполнено при анализе объема металла по месту контакта валка с заготовкой, зафиксированного в момент остановки процесса. Кроме того, неоднородное строение очага деформации подтверждается различной твердостью и структурой (рис. 4).

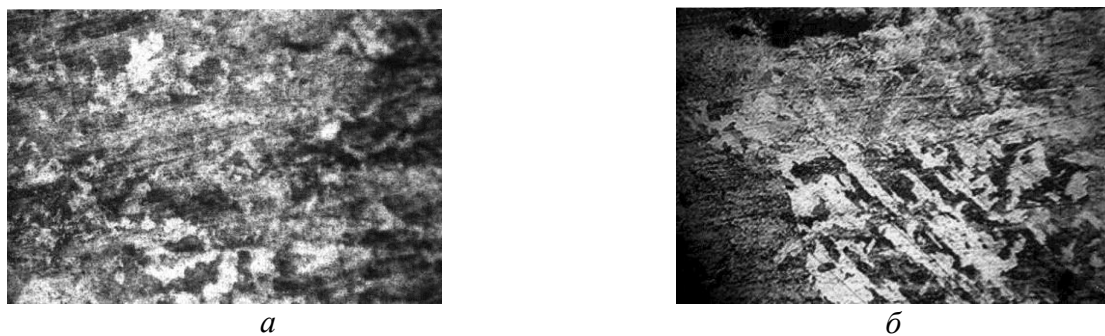


Рис. 4. Микроструктура прокатанной полосы стали 50ХГФА ($\times 270$):

a – зона с зёрнами феррита, имеющих равноосную форму; *б* – зона с вытянутыми зёрнами феррита.

Микроструктура прокатанной полосы стали 50ХГФА состоит из перлитных колоний и феррита и отличается неравномерностью, которая проявилась в размерах ферритной составляющей, имеющей практически по всему очагу деформации равноосную форму (рис. 4, *a*). Только для характерного участка с максимальной твердостью 34...36 *HRc* выявлены вытянутые зёрна феррита (рис. 4, *б*), что может свидетельствовать об отсутствии в данной области рекристаллизации.

В целом полученные результаты подтверждают модель построения очага деформации по С.И. Губкину, согласно которой максимальная деформация материала происходит по месту пересечения направлений максимальных тангенциальных напряжений, исходящих под углом 45 из точек границ периметра контакта валка с полосой.

Обсуждение результатов экспериментов

Из результатов усталостных испытаний сплава ЭИ 878 следует, что металл гофрированных панелей, изготовленных на прессе эластичной средой, имеет лучшие результаты по усталостной прочности (циклической долговечности) по сравнению с металлом панелей, штампованных на молоте в металлическом штампе. При этом в обеих технологиях сопротивление усталости материала повысилось по сравнению с его исходным состоянием. Объяснение полученных результатов проведено на основании комплексной методики исследований, включившей определение структурно-механических характеристик металла штампованных изделий. При холодной деформации повышение сопротивлению усталости вполне закономерно и соответствует положению теории усталости, согласно которому при уменьшении размера зёрен по их границам увеличивается сопротивление распространению трещин. Это подтверждается анализом микроструктур (рис. 1).

Штамповка на молоте с нагревом имеет более сложную картину. С одной стороны, металл нагревается до температур его рекристаллизации, что уменьшает сопротивление усталости. С другой, скорость деформации на молоте на два порядка выше скорости деформации на гидравлическом прессе. Поэтому процесс рекристаллизации металла гофрированных панелей происходит не в полной мере. Зависимости упрочнения металла, полученные

при механических испытаниях, согласуются с полученными результатами, подтверждающими вывод о том, что при горячей штамповке на молоте металл изделий имеет неполную рекристаллизацию.

Для случая холодного предварительного пластического деформирования полученные в работе результаты согласуются с ранее сформулированными положениями проф. Г.П. Гусяковой с сотрудниками, которые свидетельствуют о следующем. Во-первых, эффект влияния пластической деформации, в основном равномерной, на повышение ограниченного предела выносливости и циклической долговечности в диапазоне значений температур от 0,06 до 0,6 Тпл, К возрастает с увеличением способности материала к деформационному упрочнению при статическом растяжении [1]. Во-вторых, влияние предварительного деформирования на повышение ограниченного предела выносливости (на базе испытания 10^6 циклов) и долговечности (при $\sigma_a \approx 0,5 \sigma_b$) при разных температурах усиливается с улучшением способности материала в исходном состоянии к деформационному упрочнению, оцениваемой показателем A в уравнении кривой деформационного упрочнения при статическом нагружении [2].

Однако для условий горячей предварительного пластического деформирования в настоящее время основные характеристики, влияющие на сопротивление усталости материала, не выявлены. В условиях горячей раскатки полосовой заготовки на клин сопротивление усталости ее материала характеризуется сложной зависимостью. На рис. 5 приведены послойные зависимости циклической долговечности прокатанной заготовки из стали 50ХГФА со степенью обжатия 23% и 40%.

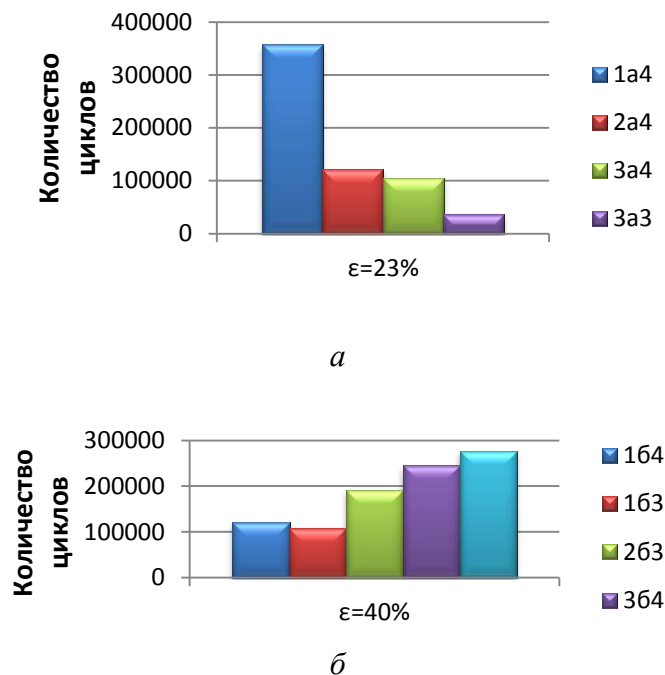


Рис. 5. Гистограммы зависимости циклической долговечности слоев (2 мм) прокатанной заготовки из стали 50ХГФА со степенью обжатия ϵ :
 $a - 23\%$; $b - 40\%$ (слои обозначены с поверхности прокатки)

Зависимости имеют сложную и неоднозначную форму. Данное обстоятельство свидетельствует о корреляции действительной степени деформации в слоях прокатываемой заготовки с величиной зерна, определяемой развитием процесса рекристаллизации в зависимости от степени деформации. Для процесса рекристаллизации при обработке давлением при высо-

ких температурах характерен значительный рост зерна при малых степенях деформации и последующее его уменьшение при дальнейшем увеличении ее степени. Как следствие, при раскатке призматической заготовки на клин при степени деформации $\varepsilon \approx 20\%$ размер зерна увеличивается с прокатываемой поверхности заготовки на поверхность, контактирующую с неподвижной опорой; при степени деформации $\varepsilon \approx 40\%$ тенденция изменяется. При этом уменьшается разность величины зерна по толщине заготовки, в силу уменьшения неравномерности деформации. Отсюда слои металла раскатанной заготовки, имеющие большую интенсивность рекристаллизационных процессов, и как следствие лучшую залечиваемость дефектов структуры, получаемых при деформации, имеют большее сопротивление усталости. Неравномерность рекристаллизации по объему рессорного листа также подтверждается неравномерностью прочностных характеристик материала. Полученные зависимости показателей механических свойств по длине горячекатаного листа сопоставимы со сформированной структурой. По всей длине листа она состоит из сорбита и феррита. По результатам металлографического анализа была обнаружена разнородность.

Таким образом, в качестве основного параметра, влияющего на сопротивление усталости пластически деформированных металлов и сплавов в условиях горячей обработки, можно рассматривать размер рекристаллизованного зерна. А именно, с увеличением степени рекристаллизации ухудшается циклическая долговечность материала.

Для определения размера зерна, отвечающего за сопротивление усталости материала, и построения диаграмм рекристаллизации 2-го рода в координатах «интенсивность деформации - средний размер (площадь) зерна - температура», на базе программного обеспечения NI Vision в среде разработки Lab VIEW фирмы National Instruments и программы Mathcad 14, разработан специализированный программный пакет [15], позволяющий выполнять автоматизированное построение трехмерной графической модели диаграммы и производить оценку неравномерности степени рекристаллизации.

В состав пакета входят две программы. Первая обеспечивает количественные измерения и обсчет микроструктуры металла. Для этого производится бинаризация цифровых фотографий микроструктуры, в результате которой элементы изображения разделяются на объекты - зерна и фон.

Фотографии микроструктур выполняются на продольных шлифах двух осаженных заготовок со степенью деформации по высоте 10% и 57%. Исследования производятся в местах, определяемых координатной сеткой. Для определения в местах исследования величины интенсивности деформации было выполнено математическое моделирование процессов осадки заготовок с применением программного комплекса «DEFORM-3D».

Результаты расчета программы, в виде подсчитанного числа зерен, их размеров (средней площади) и гистограммы распределения, сохраняются в пакете текстового редактора Microsoft excel, а также выводятся на интерфейс программы.

Программа выполняет построение графических моделей диаграмм рекристаллизации в виде трехмерного изображения взаимосвязи размера зерна, температуры и интенсивности деформации. При необходимости программное обеспечение обеспечивает выведение сечения трехмерного изображения при конкретной температуре или интенсивности деформации.

Таким образом, результаты комплексных исследований позволили уточнить информационное обеспечение, необходимое для прогнозирования усталости пластически деформированного материала изделий. Очевидна необходимость проведения деформационного анализа в силу того, что основной особенностью пластической деформации является неоднородность деформированного состояния формоизмененного изделия. При этом в качестве характеристики необходимо использование интенсивности деформации, которая позволяет определить значение конечной и итоговой деформации материальной точки, независимо от схемы формоизменения.

Выводы

1. Выполнено уточнение теории очага деформации, выразившееся в установлении основных закономерностей строения очага деформации и его изменений по ходу процесса в технологических процессах раскатки плоской заготовки на клин на плите и изготовление конструктивного элемента - рифта в листовых жесткостях.

2. Предложена схема оценки циклической долговечности пластически деформированного металла изделий, основанная на совершенствовании метода микроструктурного анализа для определения размера зерна и усовершенствования структуры технологического проектирования и информационного обеспечения для оценки деформированного состояния, структурно-механических и усталостных характеристик материала.

Библиографический список

1. **Пачурин, Г.В.** Коррозионная долговечность изделий из деформационно-упрочненных металлов и сплавов: учеб. пособие / Г.В. Пачурин. – 2-е изд., доп. – СПб.: Издательство «Лань», 2014. – 160 с.
2. Усталостное разрушение при разных температурах и долговечность штампованных металлоизделий: монография / Г.В. Пачурин [и др.]; под общей ред. Г.В. Пачурина; НГТУ. – Н. Новгород, 2010. – 169 с.
3. **Пачурин, Г.В.** Усталостное разрушение при нормальной температуре предварительно деформированных сплавов // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1990. – №10. – С. 35–38.
4. **Пачурин, Г.В.** Долговечность штампованных конструкционных материалов на воздухе и в коррозионной среде // *Заготовительные производства в машиностроении.* – 2003. – №10. – С. 21–27.
5. **Пачурин, Г.В.** Долговечность пластически деформированных коррозионно-стойких сталей // *Вестник машиностроения.* – 2012. – № 7. – С. 65–68.
6. **Пачурин, В.Г.** Формирование структуры хромистых сталей под высадку болтов / В.Г. Пачурин, А.А. Филиппов, Г.В. Пачурин // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований.* – 2011. – № 9. – С. 55–59.
7. **Pachurin, G.V.** Ruggedness of structural material and working life of metal components // *Steel in Translation.* – 2008. – №3. – Т. 38. – P. 217–220.
8. **Pachurin, V.G.** Fatigue resistance stamped on the grind and press shell plate alloy ЭИ 878 / V.G. Pachurin, V.V. Galkin, G. Pachurin // *Modern scientific research and their practical application*, edited by Alexandr G. Shibaev, Alexandra D. Markova. Vol.J 11410-020. – P. 110–114. (Kupriyenko SV, Odessa, 2014) - URL: http://www.sworld.com.ua/e-journal/jl_1410.pdf (date: 01.06.2014).
9. **Галкин, В.В.** Структурно-механические и усталостные свойства штампованных на молоте и прессе листовых гофрированных панелей из сплава ЭИ 878 / В.В. Галкин, В.Г. Пачурин, Г.В. Пачурин // *Фундаментальные исследования.* – 2013. – №10 (часть 15). – С. 3294–3298.
10. **Пачурин, В.Г.** Сопrotивление усталости штампованных на молоте и прессе листовых панелей из сплава ЭИ 878 / В.Г. Пачурин, В.В. Галкин, Г.В. Пачурин // *Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте, 2013: мат. междунар. научно-практич. конф.* – Одесса: КУПРИЕНКО СВ., 2013. – Вып. 4. – Т. 16. – С. 26–29.
11. **Терентьев, В.Ф.** Усталостная прочность металлов и сплавов / В.Ф. Терентьев. – М.: Интермет Инжиниринг, 2002. – 228 с.
12. **Пачурин, Г.В.** Эксплуатационная долговечность листовых гофрированных заготовок из некоторых титановых сплавов / Г.В. Пачурин, В.В. Галкин, В.Г. Пачурин // *Фундаментальные исследования.* – 2014. – № 11 (Ч. 4). – С. 765–773.
13. **Пачурин В.Г.** Оценка деформационной неоднородности в раскатанных изделиях с клиновым профилем / В.Г. Пачурин, В.В. Галкин, Г.В. Пачурин // *Фундаментальные исследования.* – 2014. – №11 (Ч. 4). – С. 765–773.
14. **Пачурин, Г.В.** Двухпозиционная установка для усталостных испытаний тонколистовых сварных образцов / Г.В. Пачурин, Г.П. Гуслякова // *Заводская лаборатория.* – 1980. – №10. – С. 969.

15. Манцеров С.А., Галкин В.В., Терещенко Е.Г., Дербенев А.А., Хадеев Р.Г., Пачурин В.Г. Определение величины зерна для оценки степени рекристаллизации горячедеформированных сталей и сплавов. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2105611190. Заявка № 2014662663 от 09.12.2014 г. Дата гос. регистр. В реестре программ для ЭВМ 26.01.2015 г.

*Дата поступления
в редакцию 09.12.2015*

V.G. Pachurin¹, V.V. Galkin, G.V. Pachurin¹, A.A. Derbenev²

**ASSESSMENT OF STRUCTURAL CONDITION FOR CYCLIC DURABILITY
DEFORMED MATERIAL**

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alexeev¹,
"NAZ" Sokol "²

In industrial environments the use of schemes for technological design methods of manufacturing metal forming labeled connection between the deformed state of the material and formed their structure with the cyclic life, is constrained by lack of IT support. Depending on the fatigue resistance of the material conditions of the technological conversion methods of plastic deformation is limited. The paper presents the evaluation scheme cyclic durability of plastically deformed metal products, based on the improvement of the automated method of microstructural analysis of the grain size and improving the structure of the design process and provide information to assess the fatigue characteristics of the material. The results can be used in the settlement, accompanied by design technologies, improving the knowledge base in the form of the development of engineering applications for structural and technological design and manufacture of corrugated sheet metal cladding, roll pieces with a wedge-shaped surface.

Key words: process design, sheet corrugated panel, spring leaves, microstructure, deformation, cyclic durability.