

**ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ЗАРОЖДЕНИЕ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН
В ЛОПАТКАХ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ****Кривцов В. С., Павленко В. Н., Волков И. В.**

Проанализированы технологические факторы, влияющие на зарождение усталостных трещин в лопатках авиационных двигателей на различных технологических этапах изготовления. Установлены этапы зарождения и распространения усталостных трещин. Изучено влияние ручного полирования, ультразвукового и пневмодробеструйного упрочнения на качество поверхности лопаток. Показано, что для повышения сопротивления усталости лопаток компрессора необходимо формировать характеристики поверхностного слоя методами поверхностно-пластического деформирования, которые нейтрализуют неблагоприятное влияние технологических концентраторов напряжений.

Проаналізовано технологічні чинники, що впливають на зародження втомних тріщин у лопатках авіаційних двигунів на різних технологічних етапах виготовлення. Встановлено етапи зародження та поширення втомних тріщин. Вивчено вплив ручного полірування, ультразвукового та пневмодробеструменного зміцнення на якість поверхні лопаток. Показано, що для підвищення опору втомних лопаток компресора необхідно формувати характеристики поверхневого шару методами поверхнево-пластичного деформування, які нейтралізують негативний вплив технологічних концентраторів напружень.

Technological factors affecting the nucleation of fatigue cracks in the blades of aircraft engines at different stages of manufacturing process are analyzed. Established stages of nucleation and propagation of fatigue cracks. Studied the effect hand-polishing, ultrasonic and air blast hardening on the surface quality of blades. It is shown that to improve the fatigue resistance of compressor blades it is necessary to form a surface layer characteristics with the methods of surface and plastic deformation, which neutralize the adverse impact of technological stress concentrators.

Кривцов В. С.

д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой НАУ «ХАИ»

Павленко В. Н.

канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой НАУ «ХАИ»
pavlenko_vitaliy@mail.ru

Волков И. В.

канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник НАУ «ХАИ»

УДК 621.452.3.002.3

Кривцов В. С., Павленко В. Н., Волков И. В.

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ЗАРОЖДЕНИЕ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В ЛОПАТКАХ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Анализ отказов газотурбинных двигателей, имеющих место в эксплуатации, показывает, что большинство усталостных разрушений были инициированы механическими и эрозийными повреждениями.

Появление повреждений пера лопатки в виде забоин, рисок, увеличивающих уровень локальных вибронапряжений в месте возникновения концентратора, повышает вероятность усталостного разрушения лопаток. Повреждения от попадания посторонних предметов создают серьезную проблему, так как приводят к большим дополнительным расходам при замене большого количества лопаток, переборке двигателя и балансировке ротора.

Ресурс и надежность ГТД в целом определяются работоспособностью ее наиболее ответственных и нагруженных деталей, каковыми являются лопатки компрессора. Одна из важнейших проблем для двигателей – это защита лопаток компрессора от эрозийных повреждений, резко снижающих сопротивление усталости.

Предел выносливости является важной характеристикой материала при прогнозировании долговечности детали, подвергающейся периодическому нагружению, что подчеркивает актуальность исследований влияния технологических факторов на величину сопротивления усталости. Долговечность определяется двумя стадиями усталостного разрушения – стадией зарождения трещины усталости и стадией ее стабильного распространения.

Факторы, влияющие на сопротивление усталости лопаток компрессора с комплексной обработкой, применительно к особенностям геометрии пера, технологии изготовления и повреждаемости в эксплуатации, можно условно разбить на три группы:

К первой группе следует отнести геометрические параметры кромок.

Ко второй группе факторов следует отнести основные характеристики исходной структуры поверхностного слоя.

К третьей группе факторов относятся методы деформационного упрочнения и получения диффузионных покрытий.

Далее приводятся исследования влияния этих факторов на зарождение усталостных трещин.

Источниками зарождения усталостных трещин, приводящих к разрушению рабочих лопаток компрессора, являются дефекты структуры материала, поверхностные дефекты, образованные в процессе изготовления и эксплуатации [1].

Усталостное разрушение в основном начинается у некоторой неоднородности, вызывающей концентрацию напряжений. Как на стадии зарождения, так и распространения усталостной трещины происходит пластическая деформация материала. Однако пластическая деформация, связанная с процессом усталости, часто бывает локализованной. Для многих материалов предел выносливости составляет часть условного предела текучести.

Известно, что микропластическая циклическая деформация наблюдается при напряжениях равных или даже меньших предела выносливости, даже если это напряжение значительно ниже макроскопического предела текучести [2].

Закономерности распределения работы выхода электронов на спинке и кромках лопаток позволяют с достаточной достоверностью прогнозировать место зарождения усталостной

трещины. Установлено, что после ультразвукового упрочнения шариками рассеяние долговечности лопаток компрессора уменьшается на 19,5 % по сравнению с серийной обработкой (виброполированием) [3].

На поверхности пера лопаток в процессе различных видов финишной обработки образуются технологические микродефекты, способствующие зарождению усталостных трещин, особенно на входных и выходных кромках. В работе [4] показано, что даже микроскопические повреждения повышают вероятность зарождения усталостных трещин и снижают сопротивление усталости при значительном увеличении рассеяния долговечности.

Специфическое влияние поверхности на сопротивление усталости заключается не только в наличии шероховатостей и технологических концентраторов напряжений, но и в том, что пластическое деформирование металла начинается на поверхности раньше, чем в сердцевине.

Проведенные к настоящему времени исследования не дают достаточно точных сведений о физических закономерностях поведения поверхностных слоев при различных способах макро и микродеформирования.

Целью работы является изучение влияния технологических факторов, влияющих на зарождение усталостных трещин.

Основной причиной упрочнения металла является повышенная плотность дислокаций, скапливающихся вблизи сдвигов и последующая их остановка перед различного рода препятствиями, образующимися в процессе деформирования [5]. Пластическая деформация при упрочнении сопровождается неравномерными по глубине и взаимосвязанными между собой процессами сдвига, переориентации и дробления составляющих структуры с увеличением плотности материала.

Деформационное упрочнение снижает неоднородность протекания деформаций по микрообъемам и создает благоприятные условия для более равномерного протекания пластических сдвигов, что сопровождается образованием текстуры [6].

При рассмотрении процесса усталостного разрушения материалов можно выделить два периода: период зарождения и период распространения трещин [7].

Барьерный эффект упрочненного приповерхностного слоя глубиной порядка размера зерна связан с трудностями выхода дислокаций и эстафетной передачей деформаций из внутренних объемов металла. Дислокации также задерживаются границами упрочненных зерен приповерхностного слоя.

Большое значение имеет соотношение деформированного слоя и внутреннего объема металла, поскольку это связано с формированием остаточного напряженного состояния.

Сложность прогнозирования прочности материала при циклическом нагружении связана с тем, что процесс зарождения и распространения усталостной трещины является локальным. А на сопротивление усталостному разрушению влияют многие факторы: высокие локальные напряжения, состояние поверхностного слоя, концентрация напряжений, масштабный фактор и другие [7].

При напряжении, соответствующем физическому пределу текучести, соотношение между прочностью поверхностного слоя и внутренних объемов металла достигает критического значения, при котором происходит нагрев более прочного приповерхностного слоя и начинается макроскопическое течение всего материала [7].

Текстура применительно к титановому сплаву ВТЗ-1 оказывает положительное влияние на сопротивление усталости на этапе зарождения усталостных трещин [8].

При исследовании титанового сплава ВТ9 [9] установлено, что микротрещины зарождаются на ранних стадиях циклического нагружения и растут при значениях коэффициента интенсивности напряжений, меньших пороговых. После зарождения короткие усталостные трещины распространяются с относительно высокой скоростью, однако, впоследствии их

рост быстро замедляется. Показано, что причиной зарождения и ускоренного роста коротких усталостных трещин является локальная пластическая деформация, возникающая в ослабленном поверхностном слое при напряжениях, существенно меньших макроскопического предела текучести.

Авторы работы [10] показали, что долговечность авиационных деталей в значительной мере определяется влиянием эксплуатационных и технологических дефектов. В лопатках компрессора наиболее часто встречаются дефекты, вызванные коррозией, эрозией и повреждениями, вызванными соударением с инородными телами.

При эксплуатации лопаток компрессора на поверхности пера образовались язвы диаметром до 1 мм и глубиной 0,2...0,3 мм, а глубина забоины от соударения с посторонними предметами достигала 2 мм. Подобного рода дефекты должны существенно снизить характеристики выносливости.

Расположенные вблизи поверхности дисперсные включения выступают в роли структурных концентраторов напряжений. В их окрестности наблюдается интенсивная локализация пластической деформации, что увеличивает вероятность зарождения усталостных микротрещин в пределах полос скольжения. Часть дислокаций начинает перемещаться при уровне напряжений ниже предела текучести.

Известно, что максимальные значения коэффициентов интенсивности напряжений наблюдаются для трещин на кромках лопаток, где уровень напряжений несколько ниже, чем на спинке. Это свидетельствует о том, что могут иметь место такие ситуации, когда трещины, появившиеся в менее напряженных местах лопатки (кромках), распространяются с большими скоростями и приводят к окончательному разрушению.

Лопатки компрессора имеют большую чувствительность к повреждениям от соударения с посторонними телами из-за наличия у них тонких входных и выходных кромок. Неметаллические включения также являются источником концентрации напряжений. Вблизи включений имеет место концентрация напряжений, что приводит к образованию усталостных трещин.

Авторы работ [11] установили, что поверхностное деформационное упрочнение, влияя на кинетику развития усталостной трещины, сохраняет неизменным механизм процесса усталости на стадиях, предшествующих возникновению магистральной усталостной трещины. Так же отмечается, что поверхностное пластическое деформирование снижает неоднородность протекания деформаций по микрообъемам и создает благоприятные условия для более равномерного протекания пластических сдвигов, что увеличивает ресурс пластичности материалов.

В работе [12] показано, что увеличение предела выносливости по трещинообразованию в результате наклепа связано с изменением прочностных характеристик поверхностного слоя, а его увеличение (по разрушению) – с благоприятным действием сжимающих остаточных напряжений.

В связи с наличием неразвивающихся усталостных трещин для установления связи характеристик поверхностного слоя детали с его пределом выносливости надо знать не только условия зарождения трещины в материале, но и условия, при которых эти трещины смогут распространяться.

В последнее время зарождению и распространению коротких поверхностных усталостных трещин (до 0,5 мм) в металлах уделяется все больше внимания. На этот процесс приходится значительная доля ($\approx 40...50\%$) от общей долговечности образцов, причем, микротрещины могут возникать на очень ранних стадиях циклического нагружения ($\approx 10\%$ общей долговечности) [13].

Неметаллические включения могут служить местом зарождения усталостных трещин. Величина включений в таких случаях составляет несколько микрометров [14]. Кроме того,

включения являются источником концентрации напряжений. При больших амплитудах напряжений микротрещины возникают в зонах скольжения, при меньших – в местах включений.

Существует большое количество экспериментальных данных, показывающих [15], что при напряжениях, равных пределу выносливости или несколько ниже, на поверхности после достаточно большого числа циклов возникают микротрещины.

Критический размер микротрещины пропорционален квадрату порогового значения коэффициента интенсивности напряжений и обратнопропорционален квадрату предела выносливости.

При этом предел выносливости увеличивается с повышением прочности материала. Из этого следует, что критический размер микротрещины определяет границу между зарождением и распространением трещины.

Основные факторы, способствующие процессу зарождения и развития усталостных трещин на пера лопаток компрессора (особенно на кромках), возникают на финишных этапах изготовления и в эксплуатационных условиях.

Однако отсутствуют системные исследования по оценке влияния методов поверхностного деформационного упрочнения, формирующих структуру и характеристики поверхностного слоя, оказывающих влияние на процесс зарождения и развития усталостных трещин в лопатках ГТД. При этом практически нет данных о факторах, повышающих сопротивление усталости кромок лопаток.

Конструктивные концентраторы напряжений (галтели, тонкие кромки и др.), технологические микродефекты (риски, задиры и др.) существенно снижают сопротивление усталости лопаток компрессора и в значительной степени определяют их ресурс.

При оценке влияния мелких поверхностных дефектов в образцах из сплава ВТЗ-1 на сопротивление усталости при циклическом кручении установлено, что существенное влияние на сопротивление усталости материалов при наличии поверхностных дефектов оказывают остаточные напряжения. При одних и тех же размерах, форме и ориентации мелких дефектов на поверхности их влияние на сопротивление усталости зависит от происхождения дефекта. Диаграмма статического растяжения образцов из сплава ВТЗ-1 характеризуется малым деформационным упрочнением [16] поэтому основной вклад в изменение сопротивления усталости вносят остаточные напряжения.

Установлено, что наибольшее снижение предела выносливости полированных образцов было вызвано дефектом, нанесенным электроискровым способом. Этому способствовали остаточные напряжения растяжения, а также фазовые и структурные превращения материала вблизи дефекта. Влияние предыстории возникновения дефекта на сопротивление усталости проявляется в наибольшей степени тогда, когда влияние технологических остаточных напряжений несущественно.

Шероховатости поверхности являются технологическими концентраторами напряжений и существенно влияют на сопротивление усталости деталей [17]. Установлено, что повышение высоты неровностей примерно в 6 раз приводит к увеличению технологического коэффициента концентрации напряжений почти в 2 раза.

При исследовании гладких образцов и с кольцевым надрезом ($\alpha_\sigma = 1,4$ и $2,36$) из титанового сплава ВТЗ-1 установлено [18], что наибольшую степень рассеяния имеют гладкие образцы.

Как следует из различных публикаций, конструктивные и технологические концентраторы напряжений однозначно приводят к резкому снижению сопротивления усталости лопаток компрессора. При этом не разработаны рекомендации по полной нейтрализации технологических концентраторов напряжений на поверхности пера лопаток с помощью финишных отделочно-упрочняющих методов без повреждений (перенаклепа) кромок.

По ходу технологического процесса лопатки компрессора подвергаются травлению в смеси плавиковой и азотной кислот. Как показали исследования на поверхности исследуемых заготовок лопаток после первых двух операций (штамповка, обрезка по контуру) выявлены продукты химической реакции смеси кислот с металлом после шлифования заготовок (рис. 1).

Как видно из рис. 1, г, д, е, растравы также сохранились после первой и второй вальцовок. Петрографическим анализом в лунках были выявлены продукты химической реакции и частицы абразивного материала.

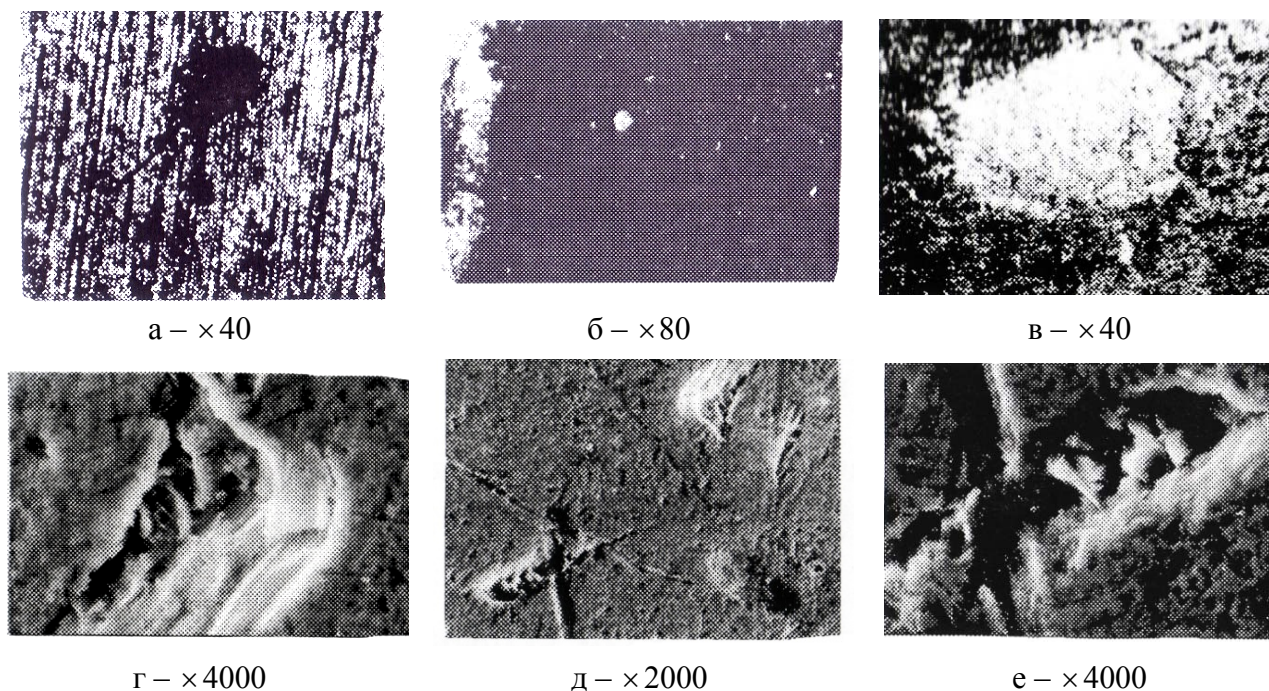


Рис. 1. Растравы, выявленные после:

а, б – шлифования штампованной заготовки; в, г – первой вальцовки; д, е – второй вальцовки

Следует отметить, что выявленные технологические дефекты поверхностей заготовок и лопаток не являются браковочными признаками. Они выявляются при увеличении от 40 до 80 раз и, как показали дальнейшие исследования, в основном устраняются на финишных операциях, в частности, в процессе поверхностного деформационного упрочнения.

При люминесцентном контроле лопаток, прошедших операцию виброполирования, в отдельных случаях выявляются царапины, которые наносятся осколками вибротел с острыми кромками, которые «раскололись» в процессе работы. Царапины устраняются ручным полированием. При контроле собственных частот колебаний лопаток также применяют ручное полирование прикорневой зоны, если собственная частота колебаний лопатки больше допустимой ($\nu > \nu_{\text{дп}}$) или полируют верхнюю часть пера лопатки, если $\nu < \nu_{\text{дон}}$.

В отдельных случаях прикорневая зона недостаточно обработана из-за затруднения доступа крупных вибротел. Такие зоны также доводятся ручным полированием.

На поверхности виброполированных лопаток видны следы (риски) «местного» ручного полирования (рис. 2, а). После ультразвукового упрочнения шариками (рис. 2, б) практически полностью исчезли риски от ручного полирования. На поверхности видны лунки от ударов шариков. Шероховатость имеет неопределенную ориентацию. В результате пневмодробеструйного упрочнения на поверхности лопаток (рис. 2, в), образовалась так называемая

ячеистая структура, которая отличается плавным микрорельефом. Ячейки представляют своего рода микрогалтели, снижающие локальную концентрацию напряжений, от следов ручного полирования.

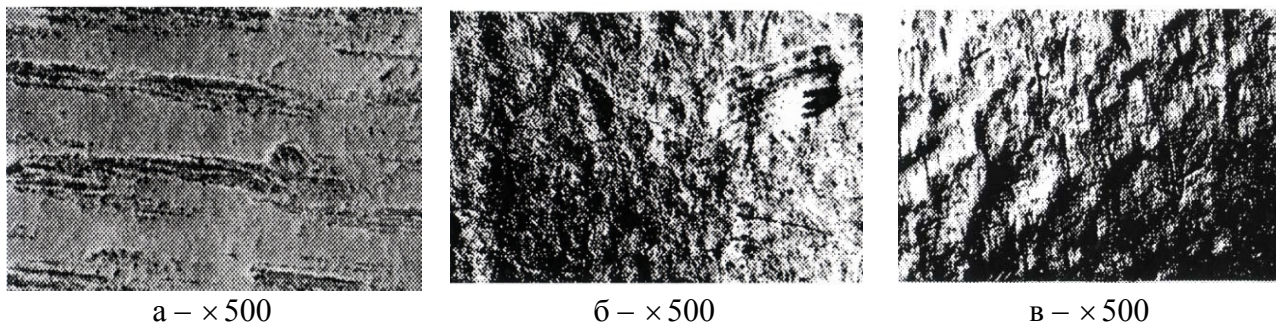


Рис. 2. Текстура поверхности после:

а – местного ручного полирования; б – ультразвукового упрочнения; в – пневмодробеструйного упрочнения

По данным испытаний на усталость и анализа причин повреждений в эксплуатации в основном усталостные трещины зарождаются на тонких входных и выходных кромках. Из этого следует, что кромки лопаток необходимо обрабатывать весьма тщательно, не допуская технологических концентраторов напряжений и создавая благоприятное сочетание характеристик поверхностного слоя. После виброполирования абразивными гранулами образуется ровная кромка без видимых следов обработки.

После ультразвукового упрочнения на кромках в отдельных местах появляются заусенцы из-за перенаклепа, которые устраняются ручным полированием. Бывают отдельные случаи «поперечного» полирования кромок, упрочненных ультразвуковым методом лопаток, что сопровождается образованием рисок – технологических концентраторов напряжений (рис. 3). Пневмодробеструйное упрочнение, при котором кромки упрочняются с меньшей интенсивностью по сравнению со спинкой и корытом, и при этом происходит скользящее соударение шариков с поверхностью лопатки, практически не меняет характер микрорельефа кромок виброполированных лопаток).

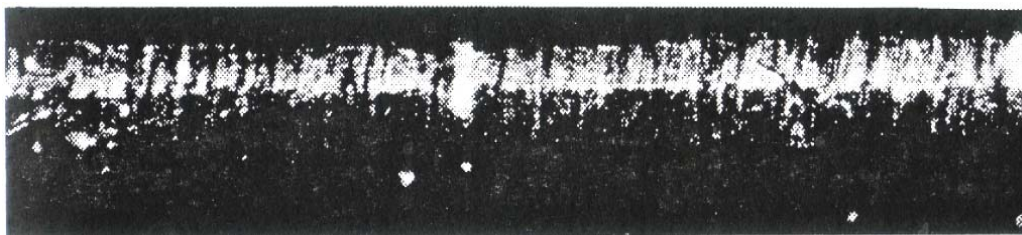


Рис. 3. Рельеф поверхности входных кромок лопаток после ультразвукового упрочнения

Таким образом, на поверхности пера лопаток имеют место технологические концентраторы напряжений в виде микродефектов (растравы, риски, сколы на кромке и др.), которые практически полностью нейтрализуются деформационным упрочнением шариками. При этом необходимо не допускать перенаклепа тонких кромок, который проявляется в виде заусенцев. Снятие заусенцев осуществляется ручным полированием кромок, которое сопровождается разупрочнением поверхностного слоя и образованием в отдельных случаях поперечных рисок – резких концентраторов напряжений.

Опыт эксплуатации ГТД показывает, что для повышения сопротивления усталости лопаток компрессора большое значение имеет формирование характеристик поверхностного слоя методами ППД, нейтрализующих неблагоприятное влияние технологических концентраторов напряжений.

ВЫВОДЫ

Проанализированы технологические факторы, влияющие на зарождение усталостных трещин в лопатках на различных технологических этапах изготовления.

Показано, что для повышения сопротивления усталости лопаток компрессора необходимо формировать характеристики поверхностного слоя методами поверхностно-пластического деформирования, которые нейтрализуют неблагоприятное влияние технологических концентраторов напряжений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Троценко В. Т. Влияние технологических и эксплуатационных факторов на сопротивление усталости и живучести рабочих лопаток ГТД / В. Т. Троценко, Б. А. Грязнов, Ю. С. Налимов // *Вибрации в технике и технологиях*. – 2001. – № 5 (21). – С. 2–6.
2. Горицкий В. М. Структура и усталостное разрушение металлов / В. М. Горицкий, В. Ф. Терентьев. – М. : *Металлургия*, 1980. – 208 с.
3. Повышение выносливости лопаток компрессора / В. А. Богуслаев О. В. Рубель, Н. В. Сахнюк [и др.] // *Технологические системы*. – 2002. – № 3 (4). – С. 65–70.
4. Троценко В. Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов : справочник. Ч. 1 / В. Т. Троценко, Л. В. Сосновский. – К. : *Наук. думка*, 1987. – 505 с.
5. Карпенко Г. В. Физико-химическая механика конструкционных материалов. Т. 1 / Г. В. Карпенко. – К. : *Наук. думка*, 1985. – 226 с.
6. Гурьев А. В. Особенности механизма пластической деформации стали при циклических нагружениях в области малоциклового усталости, упроченной поверхностным пластическим деформированием / А. В. Гурьев, В. П. Тарасов // *Поверхностное упрочнение деталей машин и инструментов : сб. науч. тр. – Куйбышев : М-во высш. и среднего спец. образования РСФСР, Куйбышев. политехн. ун-т им. В. В. Куйбышева*, 1975. – С. 3–8.
7. Терентьев В. Ф. Усталостная прочность металлов и сплавов / В. Ф. Терентьев. – М. : *Интермет инжиниринг*, 2002. – 287 с.
8. Вассерман Н. Н. Трещиностойкость сварных соединений из титановых сплавов / Н. Н. Вассерман, В. А. Субботин // *Динамика и прочность механических систем : межвуз. сб. науч. тр. – Пермь : М-во высш. и среднего спец. образования РСФСР, Перм. политехн. ин-т*, 1986. – С. 59–63.
9. Прокопенко А. В. Развитие коротких поверхностных усталостных трещин в стали 20Х13 и сплаве ВТ9 / А. В. Прокопенко, О. Н. Черныш // *Проблемы прочности*. – 1989. – № 5. – С. 12–16.
10. Циклические деформации и усталость металлов. Т. 2. Долговечность металлов с учетом эксплуатационных и технологических факторов / В. Т. Троценко, Л. А. Хамаза, В. В. Покровский [и др.]. – К. : *Наук. думка*, 1985. – 222 с.
11. Балтер М. П. Влияние поверхностного пластического деформирования на кинетику усталостного разрушения стали / М. П. Балтер, А. А. Чернякова // *Технологические методы повышения точности, надежности и долговечности в машиностроении : сб. науч. тр. – М.*, 1966. – С. 257–267.
12. Кудрявцев П. И. Нераспространяющиеся усталостные трещины : [монография] / П. И. Кудрявцев. – М. : *Машиностроение*, 1982. – 170 с.
13. Кудрявцев И. В. Влияние поверхностного пластического деформирования на зарождение трещин усталости в роторной стали / И. В. Кудрявцев // *Проблемы прочности*. – 1986. – № 4. – С. 15–19.
14. Neuman P. Coarse Slip Model of Fatigue / P. Neuman // *Acta Met.* – 1969. – V. 17. – P. 1219–1225.
15. Романив О. Н. Влияние структурных факторов на кинетику трещин усталости в конструкционных сталях / О. Н. Романив, Я. И. Гладкий, Ю. В. Зима // *Физико-химическая механика материалов*. – 1978. – № 2. – С. 3–15.
16. Повышение усталостной прочности лопаток компрессора упрочняющей обработкой / В. М. Винокуров, С. И. Пудков, В. М. Егоров [и др.] // *Авиац. пром-сть*. – 1992. – № 11. – С. 10–11.
17. Брондз Л. Д. Влияние шероховатости поверхности на выносливость и эффективность упрочнения ППД титанового сплава ВТ6 / Л. Д. Брондз // *Проблемы прочности*. – 1980. – № 8. – С. 31–34.
18. Степнов М. Н. О статических закономерностях сопротивления усталости титанового сплава ВТ3-1 / М. Н. Степнов, Л. В. Агамиров // *Заводская лаборатория*. – 1980. – № 11. – С. 1044–1046.