
**НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ,
ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ**

УДК 621.81:669.017

**ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ПОКРЫТИЯХ,
ОБРАЗОВАННЫХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ОБРАБОТКИ****© 2023 г. И. Н. Кравченко^{1,*}, С. А. Величко², В. А. Денисов³, П. В. Чумаков²,
А. С. Апатенко⁴, О. В. Бармина¹**¹*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова, Москва, Россия*²*Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева,
Саранск, Мордовия, Россия*³*Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия*⁴*Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, Москва, Россия
e-mail: kravchenko-in71@yandex.ru

Поступила в редакцию 11.11.2022 г.

После доработки 10.04.2023 г.

Принята к публикации 20.04.2023 г.

Статья посвящена обзору и анализу результатов исследования влияния электроискровой обработки на остаточный предел выносливости деталей, а также определению степени влияния электроискровой наплавки на усталостную прочность деталей автотракторной техники, восстановленных методом электроискровой обработки. Приведены рациональные технологические режимы нанесения электроискровых покрытий и укатки при поверхностном пластическом деформировании электроискровых покрытий, применяемых при восстановлении изношенных деталей.

Ключевые слова: предел выносливости, остаточные напряжения, поверхностное пластическое деформирование, усталостная прочность, электроискровая обработка, восстановление деталей

DOI: 10.31857/S0235711923040077, **EDN:** XVKCSJX

При разработке технологии восстановления изношенных деталей с использованием метода электроискровой обработки, например, поршневых пальцев, поворотных кулаков, шатунов, коленчатых и распределительных валов, полуосей, валов коробок передач и т.д., подвергающихся в процессе эксплуатации трещинообразованиям и разрушениям, необходимо решить задачу, заключающуюся в оценке влияния электроискровой обработки на остаточный предел выносливости восстановленной детали.

Внутренние напряжения, уравновешенные в малых объемах металла и соизмеримые с размерами отдельных зерен, оказывают существенное влияние на их сопротивление усталости и износостойкость рабочих поверхностей. Так, для определения напряжений на поверхности детали используют выражение

$$\sigma_0 = E(1 - \gamma_1/\gamma_2), \quad (1)$$

где E – модуль упругости исходного материала; γ_1, γ_2 – плотность структуры исходного материала и измененной структуры соответственно.

При $\gamma_1 < \gamma_2$ на поверхности создаются остаточные напряжения растяжения, а при $\gamma_1 > \gamma_2$ – остаточные напряжения сжатия.

Следует учесть, что уменьшение плотности и связанное с этим появление благоприятных сжимающих остаточных напряжений только способствует повышению вы-

носливости деталей, а решающим фактором остается структурная прочность самого материала.

В первом приближении, относительную усталостную прочность детали после доремонтного или межремонтного периода эксплуатации можно рассчитать по формуле

$$n_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1,Э}}{\sigma_{-1,Н}} \times 100\%, \quad (2)$$

где $\sigma_{-1,Э}$ – остаточный предел выносливости детали после эксплуатации; $\sigma_{-1,Н}$ – предел выносливости новой детали.

Для определения значений $\sigma_{-1,Э}$ и $\sigma_{-1,Н}$ проводятся натурные испытания деталей или фрагментов, вырезанных из натурной детали.

По данным экспериментальных исследований [1–3], для описания кривых усталости предложена теоретически обоснованная математическая модель

$$\frac{\sigma_{-1\Theta}}{\sigma_a} = 1 - \exp \left[- \left(\frac{N_{\Theta}}{A_{\Theta}} \right)^{B_{\Theta}} \right], \quad (3)$$

где σ_a – амплитуда напряжения в опасном сечении вала; $\sigma_{-1\Theta}$ – предел выносливости детали при вероятности разрушения Θ и числе циклов N_{Θ} ; A_{Θ} , B_{Θ} – параметры функции Θ , определяемые по экспериментальным данным.

Математическая модель (3) позволяет оптимально планировать ускоренные стендовые испытания деталей, и с высокой достоверностью строить кривые равной вероятности распределения пределов выносливости новых и восстановленных деталей, а также деталей из ремонтного фонда.

Например, практически для всех типов автотракторных коленчатых валов определены значения коэффициентов A_{Θ} и B_{Θ} . При известных значениях этих коэффициентов достаточно испытать на одном или двух уровнях нагрузки по три детали (образца), чтобы определить их предел выносливости до 10^7 – 10^9 циклов нагружения.

Результаты исследований деталей, восстановленных методом электроискровой обработки, показали, что усталостные трещины с большей вероятностью наблюдаются только в тех случаях, когда в поверхностном слое деталей в процессе эксплуатации действуют напряжения растяжения. Напряжение в поверхностном слое представляет собой алгебраическую сумму рабочих и остаточных напряжений. Если остаточные напряжения сжатия больше рабочих напряжений растяжения, то в поверхностных слоях не будут образовываться микротрещины или с учетом возможной релаксации остаточных напряжений в процессе эксплуатации повреждения возникнут значительно позже.

Эффективным методом создания технологических остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое является поверхностное пластическое деформирование (ППД) на рациональных режимах, без перенаклепа.

Целью статьи является обобщение экспериментальных данных и анализ результатов исследования по влиянию электроискровой обработки металлов и поверхностно-го пластического деформирования на их усталостную прочность.

Методика проведения исследований. Остаточные напряжения на кольцевых образцах определялись методом последовательного удаления слоев [2]. Относительные деформации определялись с помощью тензорезисторов 2ПКБ-10-200. На каждый образец перед испытанием, на равных расстояниях друг от друга, наклеивались по два тензодатчика. Для замера относительных деформаций в процессе снятия тонких слоев активные и компенсационные тензодатчики включались во внешний полумост мостовой схемы прибора ИДЦ-1. Внутренний полумост смонтирован в цифровом измерителе деформации. Компенсационные датчики предназначены для уменьшения температурной погрешности и представляют собой такие же тензодатчики, наклеенные на кольца из того же материала, что и исследуемые образцы.

Таблица 1. Результаты исследования предела выносливости валов с электроискровым покрытием

Покрытие	Предел выносливости валов			
	Без мехобработки		Шлифованные	
	МПа	%	МПа	%
Сталь 45, без покрытия	265	100	265	100
Наплавленные:	–	–	–	–
сталью У12	210	79.3	240	90.0
сталью ХВГ	200	75.6	250	94.2
сталью ЛГ13	160	60.5	200	75.6
серым чугуном	180	68.0	220	83.0
сормайтм № 2	160	60.5	210	79.3

Перед удалением первого тонкого слоя проводились многократные измерения нулевых показаний. Образцы растачивались на токарном станке, на каждой ступени фиксировались окружные деформации и проводился замер внутреннего диаметра образца. По вышеописанной методике на внутреннюю поверхность расточенного кольцевого образца наклеивались тензодатчики. Снимались нулевые показания, а затем образцы обтачивались на токарном станке с замером деформаций. По полученным и обработанным статистическими методами данным строилась единая деформационная кривая.

При построении единой деформационной кривой деформации рассчитывались по формуле

$$\varepsilon_1 = -\varepsilon_r \frac{R_2^2 - r^2}{r^2 - R_1^2}, \quad (4)$$

где ε_r – деформации расточки; ε_1 – деформации обточки; R_1 – внутренний радиус кольца; R_2 – наружный радиус кольца.

Окружные остаточные напряжения рассчитывали по методу Г. Закса [4, 5] при модуле упругости $E = \text{const}$

$$\sigma = -E \left[\frac{r^2 - R_1^2}{2r} \frac{d\varepsilon}{dr} + \frac{r^2 + R_1^2}{2r^2} \varepsilon(r) \right]. \quad (5)$$

Результаты исследований и обсуждение. *Первый этап исследований* заключался в проведении испытаний на усталость лабораторных образцов, восстановленных методом электроискровой обработки. В работах [6–8] приведены некоторые результаты оценки влияния ЭИО на усталостную прочность нормализованной стали 45. Эксперименты были проведены с круглыми образцами диаметром 9.48 мм, на которые были нанесены покрытия толщиной 0.2 мм на сторону, сталями У12, ХВГ и ЛГ13, серым чугуном и сормайтм № 2. После наплавки образцы шлифовались с припуском 0.1 мм. Испытания проводились на изгиб с вращением на базе 5 миллионов циклов. Результаты испытания приведены в табл. 1.

Из табл. 1 следует, что после электроискровой наплавки валов без механической обработки, наблюдается снижение предела выносливости до 39.5%, а после шлифовки происходит некоторое упрочнение, вследствие которого снижение предела выносливости не превышает 24.4%. Можно предположить, что механизм упрочнения после шлифовки сводится к снижению поверхностных остаточных растягивающих напряжений.

Таблица 2. Влияние материала электродов на усталостную прочность валов из стали 45

Материал основы и электрода	Предел выносливости		Материал основы и электрода	Предел выносливости	
	МПа	%		МПа	%
Сталь 45 (нормал.)	260	100%	сталь 45 (нормал.)	260	100%
ZrB ₂ + 5%Mo	223	88.8	Cr ₃ C ₂ + 15%Ni	194	74.6
TiC + 30%Fe	213	82.0	Cr ₃ C ₂	194	74.6
TiC	212	81.5	V ₄ C	193	74.2
TiC + 30%1X18H9T	208	80.0	T15K6	173	66.5
NbC	204	78.5	TiB ₂	183	70.4
ZrN	203	78.0	ZrB ₂	210	80.8
BK3	203	78%	BK6-OM	208	80.0
Сталь 2X13 (закал.)	450	100%	Сталь 2X13 + FeCr [1]	235–286	52–64

Таблица 3. Режимы установки ЭФИ-25М*

№	Напряжение холостого хода, В	Ток короткого замыкания, А	Рабочий ток, А
1	21–29	20–28	9–15
2	35–37	65–75	39–45
3	35–37	135–150	70–85

* Емкость накопительных конденсаторов 300 мкФ; максимальная энергия единичных импульсов 0.09–1.1 Дж.

В табл. 2 приведены результаты усталостных испытаний валов из стали 45, на поверхность которых, методом ЭИО, нанесены твердые сплавы. Из табл. 2 следует, что при электроискровой обработке твердыми сплавами, предел выносливости исходной детали снижается до 33.5%. Авторы статьи считают, что снижение предела выносливости стальных валов, обработанных твердыми сплавами T15K6, TiB₂ и V₄C, связано с наличием в поверхностных слоях высоких остаточных напряжений растяжения.

По данным исследований [5, 6] проведены усталостные испытания гладких валов из нормализованной стали 40X (предел выносливости 316.0 МПа), подвергнутых электроискровой обработке различными электродами на установках ЭФИ-25М и ЭФИ-25А на трех режимах с частотой импульса 100 Гц (табл. 3).

Электроискровая обработка проводилась на токарном станке с частотой вращения вала-образца 0.558 об/с при помощи вращающегося с частотой 3.33 об/с электрододержателя, состоящего из пяти электродов, при подачах электродов 0.125; 0.2 и 0.5 мм/об.

По результатам исследования усталостных испытаний наплавленных валов, было установлено, что их предел выносливости снижается до 50%. Общей тенденцией для валов, обработанных сталью X18H9T, является то, что с ростом энергии разряда единичного импульсного тока предел выносливости уменьшается, а с увеличением подачи электрода растет.

При электроискровой обработке валов сталью 10 на первом режиме установки ЭФИ-25М, наименьший предел выносливости наблюдался на первой подаче электрода, а наибольший на третьей подаче. При переходе на второй режим обработки, предел выносливости растет на подачах 1 и 2, а на третьей уменьшается. После перехода на третий режим обработки на третьей подаче электрода, предел выносливости растет, а на 1 и 2 подачах уменьшается.

Наибольшее падение предела выносливости валов обнаружено при электроискровой обработке электродом У8А. На первом режиме обработки наименьший предел вы-

Таблица 4. Режимы обработки и материал электрода при электроискровой наплавке на сталь 45

Материал электрода	Режимы нанесения покрытия			
	$I_{кз}, A$	$U_{кк}, B$	I_p, A	U_p, B
ВК8, Т15К6, Мо, Nb, Г13, феррохром	260	35	100	25
ВК8 + графит, феррохром + графит, хром электролитический + графит (при $C = 600$ мкФ)	160	22	15	25

Исходный предел выносливости нового вала составлял 240 МПа.

носливости на первой подачи электрода, наибольший на второй подаче. С переходом на второй режим обработки наименьший предел выносливости наблюдается на третьей подаче электрода, наибольший на второй подаче. На третьем режиме обработки наибольший предел выносливости достигается на третьей подаче.

Наименьшее падение предела выносливости обнаружено при обработке электродом из стали 45 на первом режиме. На втором режиме обработки происходит падение предела выносливости валов на всех трех подачах электрода, а на третьем режиме обработки и подачи электрода предел выносливости вала повышается до уровня первого режима.

Для определения влияния остаточных напряжений на сопротивление усталости обработанных методом ЭИО валов, испытывались валы диаметром 40 мм, изготовленные из нормализованной стали 45, на поверхность которых установкой БИГ-5 нанесены различные материалы (табл. 4).

Результаты исследования физико-механических свойств покрытий, их толщины и сплошности приведены в табл. 5. После электроискровой обработки (табл. 5) на поверхностях действуют неблагоприятные остаточные растягивающие напряжения, снижающие предел выносливости наплавленных валов.

Анализ данных табл. 5 показывает, что при дополнительном легировании наращенных поверхностей в одних случаях, например ВК8, сопровождается ростом растягивающих остаточных напряжений (серии 1 и 8), в других (FeCr), наоборот, их снижением (серии 6 и 8). Косвенным фактором, следующим из табл. 5 (серии 4 и 5) является то, что с уменьшением сплошности покрытия остаточные растягивающие напряжения также снижаются.

Испытания на усталость валов из нормализованной стали 45 диаметром 45 мм, при циклической нагрузке, показали, что предел выносливости восстановленных гальваническим хромом, гальваническим хромом + С, ВК8, FeCr, FeCr + С валов, составляют соответственно 190, 175, 150, 125 и 110 МПа, т.е. 79,0, 73,0, 62,5, 52,0 и 46,0% от эталона. Следовательно, легирование наплавленных поверхностей графитом приводит дополнительно к снижению предела выносливости валов на 8 и 12%.

Действие остаточных напряжений подобно влиянию постоянных (средних) напряжений на циклическую прочность деталей и может изменять предельные амплитуды напряжения σ_a по зависимости [9]

$$\sigma_a = \sigma_{-1} - \psi_{\sigma} \sigma_0, \quad (6)$$

где σ_{-1} – предел выносливости детали при циклической нагрузке, при $\sigma_0 \approx 0$; ψ_{σ} – коэффициент влияния остаточных напряжений растяжения на предел выносливости детали; σ_0 – остаточные напряжения растяжения.

Сильное влияние остаточных напряжений на усталостную прочность наблюдается для высокопрочных металлов и более слабое – для мягких пластичных сталей. Таким образом, покрытия, полученные электроискровой обработкой, как правило, приводят к снижению усталостной прочности восстановленной детали. Поэтому в технологиче-

Таблица 5. Характеристики поверхностных слоев валов, наплавленных электроискровым способом различными электродами

№	Материал электрода	Микротвердость слоя, МПа		Толщина слоя, мкм		Сплошность слоя, %		Остаточные напряжения растяж., МПа	
		белого	диффузионного	белого	диффузионного	белого	диффузионного	осевые	тангенциальные
1	ВК8	9350	3730	50–140	50–140	70	82	145	204
2	T15K6	8630	5930	40–80	20–50	66	87	168	158
3	Mo	8750	5170	30–160	60–70	78	88	115	144
4	Nb	9800	5900	50–160	120–200	100	100	230	324
5	Г13	7400	5420	10–20	40–90	33	62	78	79
6	FeC	8320	5030	30–80	30–60	75	89	192	189
7	ВК8+С	8800	6070	20–40	40–60	35	67	165	186
8	FeCr+С	7750	5950	40–80	60–100	89	94	62	89
9	Сг (электр.) + С	6850	–	~155	–	98	–	74	74
10	Сг (электр.)	9400	–	~155	–	–	–	29	29

ский процесс восстановления деталей методом электроискровой обработки при необходимости следует вводить упрочняющую обработку, в частности, обкатку поверхности роликом или шариком [10–12].

На образцах размером $120 \times 20 \times 2$ мм, изготовленных из нормализованной стали 45, исследовали эффективность влияния ППД на текстуру и остаточные напряжения покрытий. На образцах диаметром 40 мм и длиной 175 мм, изготовленных из нормализованной стали 45, исследовали эффективность влияния ППД на текстуру и сопротивление усталости. Покрытие наносилось ручным вибратором на режиме 8 ($J_p = 10.5 \pm \pm 2.4$ А, частота импульса тока $\nu = 220$ Гц, $U_p = \sim 60$ В и $C = \sim 1560$ мкФ) установки “БИГ-5”. Технологические параметры упрочнения имели следующие значения: наружный диаметр ролика 45 мм; профильный радиус 2 мм; усилие обкатки 200–500 Н; подача 0.1–0.2 мм/об; угловая скорость вращения образца 60 мин^{-1} . Глубина укатки наплавленной поверхности составляла 0.15–0.5 толщины покрытия.

Внешний вид металлических поверхностей, полученных в результате электроискровой обработки, отличен от вида поверхностей, полученных механической обработкой и электроискровой обработки в жидкости. После сглаживания случайно прилипших частичек распыленного металла на поверхности остаются равномерно расположенные скругленные сферические выступы и впадины. Микрорельеф имеет практически одинаковые свойства по всем направлениям и без гребешков, как после механической обработки.

После укатки поверхностей роликами, параметры шероховатости профиля существенно меняются, и комплексный параметр шероховатости снижается от двух до десяти и более раз. В табл. 6 приведены некоторые результаты физических исследований покрытий, образованных методом электроискровой обработки различными электродами.

Таблица 6. Характеристики поверхностных слоев валов, наплавленных методом электроискровой обработки, различными электродами

№ п/п	Материал электрода	Микротвердость слоя, МПа		Толщина слоя, мкм		Сплошность слоя, %		Остаточные напряжения растяж., МПа	
		белого	диффузионного	белого	диффузионного	белого	диффузионного	осевые	тангенциальные
1	20X13	6600	4100	70–160	40–130	72	88	125	180
2	65Г	8900	6100	80–180	40–90	85	90	160	170
3	Серый чугун	5600–7900	4000	60–150	50–80	80	90	130	1175
4	ШХ-15	9000–9800	6900	80–170	70–130	80	90	135	124
5	Cr	7700–9800	6100	50–90	40–80	80	90	160	170
6	Медь	2600–5000	2600	60–80	20–40	90	95	80	80

Микроструктура получаемых слоев свидетельствует, что под действием электрических импульсов в них протекают весьма сложные процессы. При укатке поверхностей, образованных методом электроискровой обработки, со степенью наклепа $\sim 20\%$, глубина наклепанного слоя составляет $\sim 35\%$ белого слоя, величина осевого остаточного напряжения сжатия – (220–280) МПа, а шероховатость участков опорной поверхности (1.4–2.1) *Ra*.

Усталостные испытания образцов деталей, поверхности которых наплавлены методом электроискровой обработки различными электродами и укатанными роликами показали, что относительный предел выносливости составляет от 1.1 до 1.25.

Экспериментальные данные показали, что усталостная прочность сталей после ЭИО и ППД роликами определяется не только уровнем остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое, но также и глубиной зоны их распространения и градиентом изменения по глубине. Увеличение глубины зоны распространения остаточных напряжений сжатия до определенного предела (устанавливается экспериментально) влияет на повышение усталостной прочности сильнее, чем увеличение напряжения сжатия в тонком приповерхностном слое.

Второй этап исследований заключался в испытаниях на усталость восстановленных методом ЭИО натурных деталей. При этом обследованию подлежали коленчатые валы двигателей внутреннего сгорания с задирами шатунных и коренных шеек и трещинами [13, 14], результаты которых приведены в табл. 7.

При заедании подшипниковых узлов происходит проворот вкладышей, схватывание рабочих поверхностей с выделением в зоне трения больших температур. Значительная часть тепла идет на нагрев поверхности шеек, что приводит к отпуску закаленных слоев.

Металлографические исследования показали, что в процессе заедания происходит изменение структуры металла и снижение твердости приповерхностных слоев металла до 50%.

В связи с этим было проведено экспериментальное исследование по восстановлению и закалке коренной шейки со следами заедания, коленчатых валов двигателей Д-240, снятых с доремонтного периода эксплуатации, электроискровым способом. Закалка шейки с одновременным нанесением покрытия толщиной до 0.120 мм проводилась

Таблица 7. Распределение коленчатых валов (КВ) с задирами шеек и трещинами

Тип коленчатого вала	Объем выборки	Число КВ с задирами шеек/трещинами	Доля КВ с задирами шеек/трещинами, %
КамАЗ-740 (дорем. экспл.)	557	117/51	21.2/9.2
ЯМЗ-238НБ (всего):	176	24/23	13.6/13.2
дорем. эксплуатация	66	8/0	12/0
межрем. эксплуатация	110	16/4	14.5/4.0
ЯМЗ-650 (смешанный)	587	62/42	10.5/7.0
Д-260 (межр. экспл.)	700	112/28	16/4
Д-240 (межр. экспл.)	540	92/28	17.1/5.0
Д-245 (межр. экспл.)	900	108/27	12/3
ЗМЗ-511 (всего):	410	69/37	16.8/9.0
1-й межремонтный	135	14/8	10.3/6.0
2-й межремонтный	105	13/8	12.3/8.0
3-й межремонтный	85	18/9	21.1/11.0
4-й межремонтный	85	24/12	28/14

дисковым электродом из материалов 65Г и 20Х13 установкой “БИГ-5”. После ручного шлифования (очистки) восстановленной коренной шейки она подверглась укатке роликами со степенью наклепа $\sim 20\%$ (под размер) и глубиной наклепанного слоя $\sim 35\%$ белого слоя, а галтели – ручной чеканке. После укатки шероховатость участков опорной поверхности составила $(0.4-0.6)Ra$. Затем укатанная поверхность шейки вала подверглась полировке.

Усталостные испытания восстановленных коленчатых валов показали, что их минимальный относительный предел выносливости равен 0.98, т.е. соответствует нормативным требованиям. Исследования остаточных напряжений в приповерхностных областях восстановленных поршневых пальцев показали, что остаточные напряжения сжатия составляют ~ 109 МПа.

В работе [15] исследованы остаточные пределы выносливости поворотных кулаков автомобиля ГАЗ-3307 после доремонтной эксплуатации и восстановления методом ЭИО. Результаты испытания натуральных деталей показали, что предел выносливости новых поворотных кулаков составляет 130 МПа, а бывших в эксплуатации 115 МПа, т.е. наблюдается снижение их усталостной прочности на 12%, что вызвано накоплением повреждений в процессе их эксплуатации.

Изношенные посадочные места под подшипники поворотных кулаков были наплавлены методом ЭИО электродами из стали 10 и стали 45. После восстановления наплавленные поверхности были подвергнуты поверхностно пластическим деформациям с целью улучшения текстуры поверхности и снятия остаточных растягивающих напряжений.

Усталостные испытания восстановленных поворотных кулаков показали, что их предел выносливости находится на уровне 115 МПа, т.е. равен пределу выносливости изношенного поворотного кулака.

Выводы. Восстановление изношенных рабочих поверхностей деталей автотракторной техники методом электроискровой обработки сопровождается возникновением в формируемых покрытиях нежелательных остаточных напряжений растягивающего характера, что приводит к значительному снижению (на 12–22%) усталостной прочности восстановленной поверхности.

Применение поверхностно-пластической деформации, формируемых методом ЭИО покрытий, со степенью наклепа 20% позволяет изменить текстуру и значительно снизить растягивающие напряжения восстановленных поверхностей, что приводит к повышению усталостной прочности детали до значения, соответствующего нормативным требованиям.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанов М.А., Степанов А.П. Способ определения и оценки дефектов и внутренних напряжений в протяженных стальных изделиях с симметричными поперечными сечениями // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2020. Т. 66. № 2. С. 42.
2. Пашков А.Е., Чапышев А.П., Пашков А.А. и др. К определению внутренних силовых факторов процесса дробеударного формообразования // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 12. С. 32.
3. Климова Л.Г. Влияние остаточных напряжений на изгибную жесткость валов, упрочненных охватывающим деформированием // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2021. № 25 (4). С. 412.
4. Королев А.В., Мазина А.А., Яковишин А.С. и др. Технологические причины возникновения остаточных напряжений // Современные материалы, техника и технологии. 2016. Т. 8. № 5. С. 116.
5. Костичев В.Э. Применение динамического моделирования для оценки влияния упрочняющей обработки на сопротивление усталости // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2015. Т. 14. № 1. С. 147.
6. Дехтярь Л.И., Игнатков Д.А., Коваль Н.П. и др. Влияние электроискрового легирования на усталостную прочность валов // Электронная обработка материалов. 1974. № 3. С. 32.
7. Игнатков Д.А., Парканский Н.Я., Дехтярь Л.И. Характеристики упругости, остаточные напряжения и усталостная прочность при электроискровом легировании порошковыми материалами // Повышение прочности деталей сельскохозяйственной техники. Кишинев: Изд-во КСХИ, 1978. С. 27.
8. Фомин Н.Е., Хасан И.Х., Кляшкин В.М. Влияние электроискрового легирования на механические свойства Al–Si–Cu сплавов // Вестник Донского государственного технического университета. 2019. Т. 19. № 2. С. 138.
9. Степанов М.А., Степанов А.П. Оценка распределения изгибных напряжений и дефектов внутри симметричных поперечных сечений стальной балки // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2019. Т. 63. № 3. С. 22.
10. Павлов В.Ф., Кирпичев В.Ф. и др. Исследование влияния рабочей температуры на сопротивление усталости накатанных роликами болтов из стали ЭИ696 // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2017. Т. 19. № 2. С. 274.
11. Злобин А.С. Связь характеристик малоциклового и многоциклового усталости резьбовых деталей с остаточными напряжениями // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17. № 1. С. 128.
12. Павлов В.Ф., Кирпичёв В.А., Кочерова Е.Е. и др. Оценка малоциклового усталости на основе использования зависимости Мэнсона–Коффина при отнулевом цикле “мягкого” нагружения // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2017. Т. 16. № 1. С. 129.
13. Кирпичёв В.А., Вакулюк В.С., Букатый А.С. и др. Моделирование остаточного напряженного состояния поверхностно упрочненных деталей по остаточным напряжениям образца-свидетеля // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16. № 6 (2). С. 461.
14. Дементьев И.И., Устинов А.Н. Метод снижения остаточных напряжений в композитных элементах конструкций космических аппаратов // Альманах современной науки и образования. 2017. № 6 (119). С. 27.
15. Коротаев Д.Н., Алмбаева Б.Ш. Повышение эффективности восстановления стальных деталей методом электроискрового легирования // Вестник СибАДИ. 2012. Вып. 5 (27). С. 30.