

УДК 621.787.4 + 539.3

## ОЦЕНКА НАПРЯЖЁННОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ ПОСЛЕ УПРОЧНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

© 2015 М. Б. Сазонов, Л. В. Соловацкая

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Рассмотрен способ контроля дробеударных методов поверхностного пластического деформирования. Показано, что контроль процесса упрочнения деталей из титановых сплавов возможен по деформационному прогибу пластин из углеродистых сталей. Ввиду различия упругих и пластических свойств материалов и разной склонности к упрочнению деформация их во времени будет протекать с различной скоростью. При наибольшем прогибе контрольной пластины он может не соответствовать необходимой степени упрочнения обрабатываемой детали, изготавливаемой из другого материала. При контроле упрочнения по пластинам из стали У8А возможны случаи недостаточного упрочнения или переупрочнения поверхностного слоя детали. Одним из показателей поверхностного слоя является его энергетический уровень, поэтому в качестве критерия оценки напряжённо-деформированного состояния поверхностного слоя может быть использована интенсивность экзoeлектронной эмиссии поверхности обработанной детали, сравнивая которую с эталоном, можно осуществлять неразрушающий контроль упрочнения и отделки поверхностного слоя.

*Упрочнение, деформация, контроль, обработка микрошариками, экзoeлектронная эмиссия, шероховатость, наклёп, остаточные напряжения.*

doi: 10.18287/2412-7329-2015-14-3-467-473

Основным направлением в развитии дробеударных методов упрочнения является создание производительного и надёжного оборудования, обеспечивающего высококачественный процесс поверхностного пластического деформирования (ППД) [1]. Одним из путей повышения надёжности работы дробеструйных установок является оснащение их контрольно-измерительной аппаратурой, обеспечивающей регистрацию и регулирование параметров режима обработки.

В настоящее время при обработке деталей на дробеударных и сопловых установках часто контроль упрочнения поверхностного слоя производится по прогибу пластин размером 70×20×1,2 мм, изготовленных из полос углеродистой стали У8А путём вальцевания или шлифования с последующей термообработкой до HRC = 45...50.

Эти пластины применяются при упрочнении деталей из различных материалов, в том числе и из титанового сплава

BT9. Можно предположить, что ввиду различия упругих и пластических свойств материалов и разной склонности к упрочнению деформация их во времени будет протекать с различными скоростью и интенсивностью [2]. При наибольшем прогибе контрольной пластины, соответствующем порогу насыщения поверхностного слоя пластическими деформациями и наибольшему уровню в нём сжимающих остаточных напряжений, прогиб может не соответствовать необходимой степени упрочнения обрабатываемой детали, изготавливаемой из другого материала. Тогда при контроле упрочнения по пластинам из стали У8А возможны случаи недостаточного упрочнения или переупрочнения поверхностного слоя детали, что может привести к её ускоренному усталостному разрушению [3].

Для проверки этого предположения применительно к сплаву BT9 [4] были проведены экспериментальные исследования деформаций и остаточных напря-

жений, возникающих при упрочнении контрольных пластин из стали У8А и сплава ВТ9 на дробемётной установке микрошариками диаметром 0,1...0,3 мм. Изменение деформационного прогиба пластин по времени показано на рис. 1.

Как видно из рис. 1, характер изменения прогиба пластин из сплава ВТ9 (кривая 1) и стали У8А (кривая 2) одинаков. Вначале происходит линейное нара-

стание прогиба с несколько большей интенсивностью для титанового сплава, затем оно замедляется и при  $\tau = 3...4$  мин прогиб достигает максимального значения, происходит насыщение поверхностного слоя пластической деформацией. При дальнейшем увеличении времени упрочнения до 5...6 мин величина прогиба остаётся неизменной, а затем несколько уменьшается за счёт перенаклёпа.

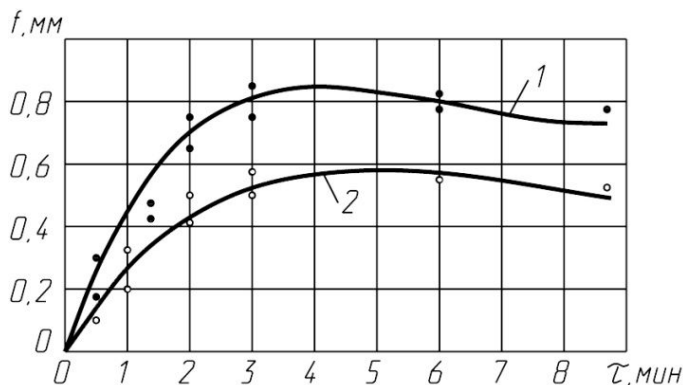


Рис.1. Изменение деформационного прогиба  $f$  контрольных пластин после обработки микрошариками в зависимости от времени упрочнения  $\tau$ : 1 – сплав ВТ9; 2 – сталь У8А

На рис. 2 показаны эпюры остаточных напряжений, формирующиеся в поверхностном слое пластин из стали У8А (а) и сплава ВТ9 (б) при различном времени обработки, а на рис. 3 – графики изменения напряжений во времени на раз-

личных уровнях от поверхности. С увеличением времени упрочнения до 3...4 мин уровень их и глубина распространения возрастают. Это соответствует диапазону времени нарастания деформационного прогиба образцов (рис. 1).

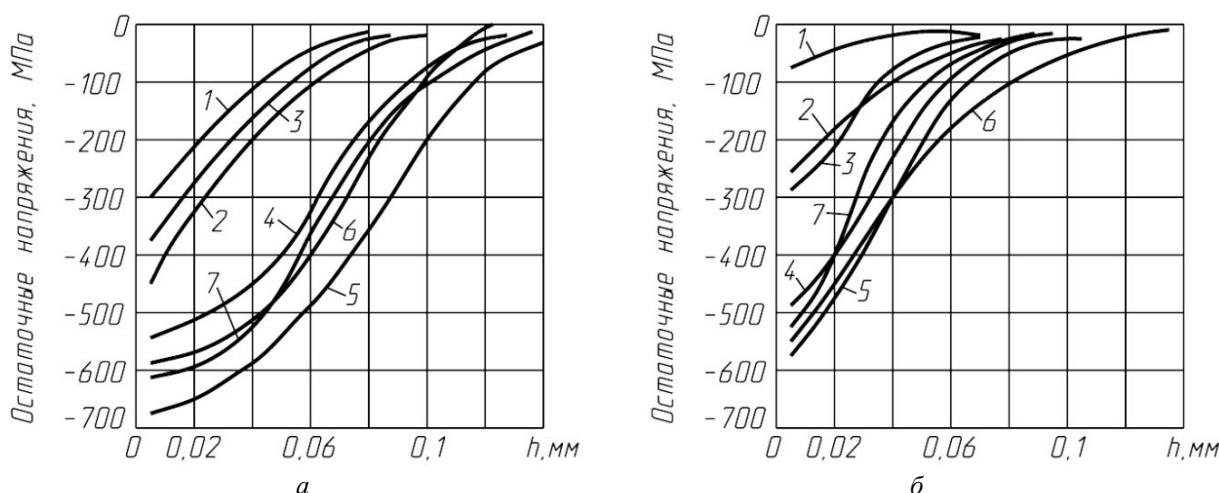


Рис. 2. Изменение остаточных напряжений по глубине  $h$  в контрольных образцах из стали У8А (а) и сплава ВТ9 (б) при ОМШ ( $V = 46$  м/с,  $d_{ш} = 0,1...0,2$  мм) с различным временем упрочнения  $\tau = 0,5$  мин (1); 1 мин (2); 1,5 мин (3); 2 мин (4); 3 мин (5); 6 мин (6); 9 мин (7)

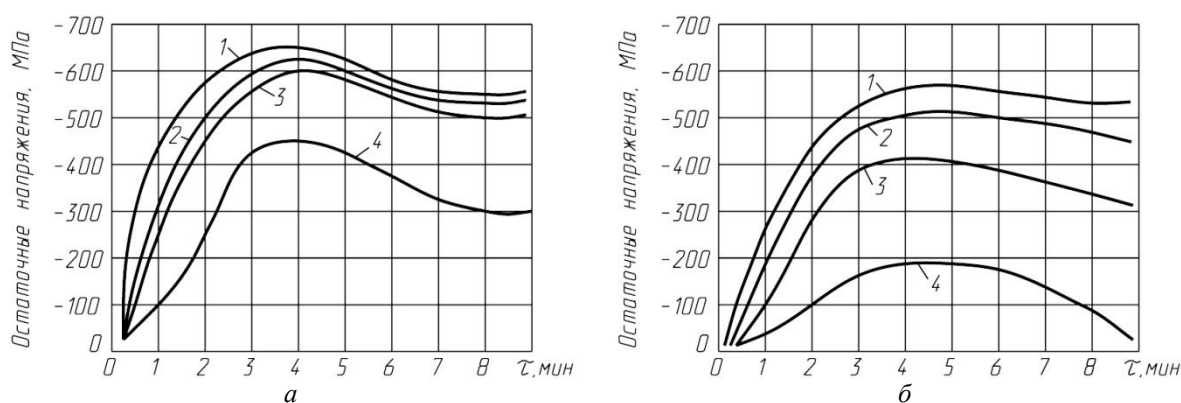


Рис. 3. Изменение остаточных напряжений от времени обработки  $\tau$  в контрольных образцах из стали У8А (а) и сплава ВТ9 (б) при ОМШ ( $V = 46$  м/с,  $d_{ш} = 0,1 \dots 0,2$  мм) на глубине  $h = 0,005$  мм (1);  $0,015$  мм (2);  $0,03$  мм (3);  $0,06$  мм (4)

В дальнейшем с увеличением времени остаточные напряжения в верхних слоях образцов из стали У8А несколько снижаются, а для сплава ВТ9 остаются практически неизменными до 8 мин. Это свидетельствует о том, что сплав ВТ9 менее чувствителен к перенаклёпу. Таким образом, в обоих случаях остаточные напряжения достигают наибольших значений при времени упрочнения, равном 3...6 мин, что соответствует наибольшему деформационному прогибу.

На основании изложенного можно сделать вывод, что при упрочнении деталей из титанового сплава ВТ9 для контроля упрочнения можно использовать пластины из углеродистой стали У8А.

К недостатку данного метода контроля можно отнести разный порог насыщения пластической деформацией поверхностного слоя, который у титанового сплава ВТ9 равен 3...6 мин, а у стали У8А – 3...4 мин. Это может привести к неточности оценки степени упрочнения.

Одним из показателей состояния поверхностного слоя является его энергетический уровень. Аккумулирование энергии внешнего воздействия при различных видах обработки, а также образование при деформации напряжённости в кристаллической решётке и структурных дефектов обуславливают повышение внутренней потенциальной энергии в поверхностных слоях деталей, которое со-

провождается явлением экзоэлектронной эмиссии (ЭЭЭ). Для контроля энергетического состояния поверхностного слоя после различных видов обработки можно использовать устройства, основанные на регистрации ЭЭЭ.

Исследования взаимосвязи физико-механических характеристик поверхностного слоя металлов с интенсивностью ЭЭЭ показали высокую чувствительность метода ЭЭЭ к изменению микротвёрдости, химического и фазового состава поверхностного слоя, толщины и состава окисной плёнки. Однако эти исследования не носят комплексного характера, не показывают связи ЭЭЭ с такими важными эксплуатационными характеристиками, как шероховатость и остаточные напряжения поверхностного слоя деталей, сопротивление усталости.

Для регистрации ЭЭЭ использовалась установка, состоящая из вакуумной камеры и комплекса электронной аппаратуры. Блок-схема установки представлена на рис. 4.

В вакуумной камере 1 располагается координатный столик 2, на нём крепится испытуемый образец 3 и детектор экзоэлектронов 4, в качестве которого использовался вторичный электронный умножитель (ВЭУ). Эмиссия стимулируется нефльтрованным ультрафиолетовым светом от дейтериевой лампы 5 типа ЛД через систему диафрагм и кварцевых линз б.

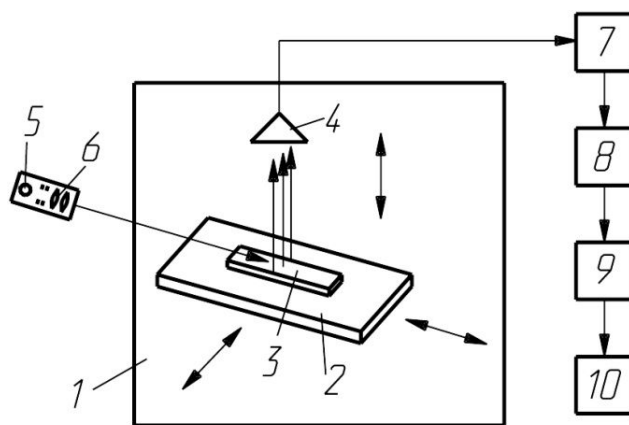


Рис. 4. Схема установки для регистрации экзоэлектронной эмиссии

Для нормальной работы ВЭУ в счётном режиме необходимо вакуумирование измерительной камеры до остаточного давления  $10^{-3}$  Па. Чтобы надёжно регистрировать слабые эмиссионные токи, необходимо высокое усиление выходного сигнала ( $10^{10} \dots 10^{12}$ ). Такой коэффициент усиления, равный  $10^7$ , реализуется при использовании ВЭУ, совместно с комплексом электронной аппаратуры, состоящей из предусилителя 7, импульсного усилителя 8, дискриминатора 9 и регист-

ратора 10 (цифрового индикатора). Количественно ЭЭЭ оценивалась средней интенсивностью  $J_{имп/с}$  экзоэлектронной эмиссии.

В табл. 1 и на рис. 5 и 6 приведены опытные данные о величине интенсивности ЭЭЭ образцов из сплава ВТ9 после различных видов и режимов отделочно-упрочняющей обработки, показана связь  $J$  с параметрами качества поверхностного слоя и пределом выносливости при симметричном изгибе.

Таблица 1. Зависимость интенсивности экзоэлектронной эмиссии от параметров качества поверхностного слоя и режимов упрочнения образцов из сплава ВТ9

Номер серии	Вид обработки	Параметры качества поверхностного слоя			Предел выносливости $\sigma_{-1}$ , МПа
		$\sigma_{пов}$ , МПа	Ra, мкм	$J$ , имп/с	
1	ОМШ*/V = 37 м/с, $\tau$ = 3 мин	-480	1,1	410	320
2	Полирование + ВКПАЛ*	+50	0,2	500	340
3	Полирование	-100	0,3	720	370
4	ОМШ/V = 46 м/с, $\tau$ = 3 мин + ВШ*	-310	0,5	700	380
5	ОМШ/V = 46 м/с, $\tau$ = 3 мин	-510	1,2	680	380
6	ОМШ/V = 46 м/с, $\tau$ = 3 мин + ВКПАЛ	-280	0,2	1400	460
7	ОМШ/V = 46 м/с, $\tau$ = 6 мин	-420	1,6	400	340
8	ОМШ/V = 46 м/с, $\tau$ = 3 мин + ВУ*	-540	0,9	900	460

\* ОМШ – обработка микрошариками, ВКПАЛ – виброконтактное полирование алмазной лентой, ВШ – виброшлифование, ВУ – виброупрочнение

Из рис. 5 и 6 видно, что величина интенсивности ЭЭЭ поверхностного слоя существенно зависит от напряжённо-деформированного и геометрического состояния поверхностного слоя.

При увеличении шероховатости Ra от 0,2 до 1,6 мкм (рис. 5, а) интенсивность ЭЭЭ имеет тенденцию к снижению, что, по-видимому, связано с большим рассеи-

ванием эмиссии электронов. Однако наблюдается разброс данных, который можно объяснить значительным влиянием разного уровня наклёпа (остаточных напряжений) на повышение общего уровня внутренней энергии и соответствующего увеличения экзоэмиссии при различных видах упрочняюще-отделочной обработки. Это хорошо подтверждается сопостав-

лением интенсивности ЭЭЭ на образцах 2-й, 3-й и 6-й серий.

При одинаковом уровне шероховатости  $Ra = 0,2$  мкм образцов 2-й и 6-й серий интенсивность образца 6-й серии ( $\sigma_{max} = -280$  МПа) значительно больше, чем у образцов 2-й серии ( $\sigma_{max} = +50$  МПа), у образцов 3-й серии с небольшим упрочнением ( $\sigma_{max} = -100$  МПа) интенсивность ЭЭЭ немного выше, чем у образцов 2-й серии (рис. 5, б). При шероховатости  $Ra = 1,1 \dots 1,6$  мкм у образцов 1-й, 5-й и 7-й серий интенсивность ЭЭЭ на образце 5-й серии в 1,5...2 раза выше, чем на образцах

7-й и 1-й серий с более низким уровнем остаточных напряжений. То же видно из сопоставления образцов 4-й и 8-й серий с  $Ra = 0,5 \dots 0,9$  мкм. Уровень интенсивности ЭЭЭ образца 8-й серии в 1,3 раза выше, чем у образца 4-й серии, хотя напряжения значительно разнятся ( $\sigma_{max} = -540$  МПа и  $\sigma_{max} = -310$  МПа). На небольшую разницу интенсивности ЭЭЭ образцов 4-й и 8-й серий, имеющих сравнительно большое отличие по остаточным напряжениям, накладывает отпечаток более высокий уровень шероховатости образца 8-й серии.

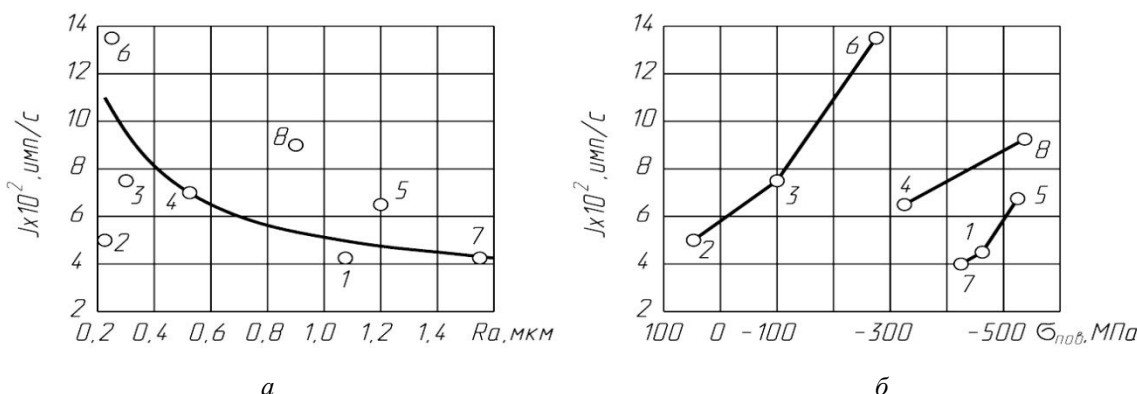


Рис. 5. Зависимость интенсивности экзоэлектронной эмиссии  $J$  от шероховатости  $Ra$  (а) и остаточных напряжений  $\sigma_{пов}$  (б)

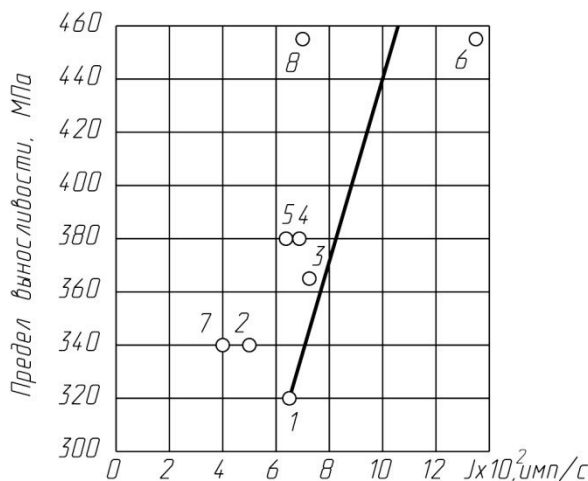


Рис. 6. Зависимость предела выносливости от уровня интенсивности экзоэлектронной эмиссии  $J$  образцов из сплава ВТ9, обработанных на различных режимах

На рис. 6 показана связь изменения предела выносливости с интенсивностью ЭЭЭ. С увеличением интенсивности ЭЭЭ предел выносливости образцов возрастает по линейной зависимости при сравни-

тельно небольшом разбросе данных. Это можно объяснить тем, что и интенсивность ЭЭЭ, и предел выносливости возрастают с увеличением степени упрочнения и остаточных напряжений сжатия по-

верхностного слоя и уменьшением шероховатости поверхности. Полученные результаты позволяют сделать вывод о функциональной связи между пределом выносливости и интенсивностью ЭЭЭ.

На основании статистических данных, характеризующих предлагаемый метод упрочняюще-отделочной обработки, можно в качестве неразрушающего контроля заданного напряжённно-деформированного состояния поверхностного слоя и обеспечения планируемого уровня выносливости использовать интенсивность ЭЭЭ.

Проведённые исследования показали, что при дробеударной обработке деталей из титанового сплава ВТ9 контроль процесса упрочнения возможен по деформационному прогибу пластин, изготовленных из углеродистой стали У8А. Однако возможны ошибки при оценке

степени упрочнения из-за различных упруго-пластических свойств обрабатываемого материала и материала контрольных пластин, возможных отклонений физико-механических свойств и состояния поверхностного слоя при изготовлении пластин, влияющих на величину прогиба.

В результате исследований выявлено, что для каждой обработки деталей различными методами ППД характерно своё напряжённно-деформированное и соответственно энергетическое состояние поверхностного слоя.

В качестве критерия оценки энергетического состояния поверхностного слоя обработанной детали может быть использована интенсивность ЭЭЭ поверхности обработанной детали, сравнивая которую с эталоном, можно осуществлять неразрушающий контроль упрочнения и отделки поверхностного слоя.

### Библиографический список

1. Багтер М.А. Упрочнение деталей машин. М.: Машиностроение, 1978. 181 с.
2. Кудрявцев И.В., Вайнштейн В.Г. Влияние поверхностного механического упрочнения на усталость титанового сплава в малоцикловой области // Металловедение и термическая обработка металлов. 1971. № 12. С. 44-46.
3. Иванова В.С. Разрушение металлов. М.: Металлургия, 1979. 166 с.
4. Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. М.: Машиностроение, 1988. 240 с.

### Информация об авторах

**Сазонов Михаил Борисович**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологий производства двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: sazonov.mihail.56@yandex.ru. Область научных интересов: механическая обработка материалов.

**Соловацкая Людмила Владимировна**, старший преподаватель кафедры технологий производства двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: lyud.Kiselewa@yandex.ru. Область научных интересов: механическая обработка материалов.

## ESTIMATION OF TENSION OF THE SURFACE LAYER OF PARTS AFTER HARDENING BY DIFFERENT METHODS OF SURFACE PLASTIC DEFORMATION

© 2015 M. B. Sazonov, L. V. Solovatskaya

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

A method of control of shot impact methods of surface plastic deformation is presented in the paper. The possibility of controlling the hardening process of parts made of titanic alloys in terms of deflection of plates made of carbon steels is shown. Because of differences in the resilient and plastic properties of materials and as they show different tendencies to hardening their deformation will occur with different speed and intensity over time. In the case of the greatest deflection of the test plate it may not be up to the required degree of hardening of the part made of another material. Cases of insufficient hardening or rehardening of the part's surface layer may occur in controlling the hardening on plates made of U8A steel. One of the indices of the surface layer is its energy level, therefore the intensity of exoelectronic emission of the surface of the part treated can be used as a criterion of estimation of the stress-strain state of the surface layer. Non-destructive testing of hardening and finishing of the surface layer can be accomplished comparing the part tested with the reference standard.

*Hardening, deformation, control, microball treatment, exoelectronic emission, roughness, work hardening, residual stresses.*

### References

1. Bagter M.A. *Uprochnenie detaley mashin* [Hardening of machine parts]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1978. 181 p.
2. Kudryavtsev I.V., Vaynshteyn V.G. Effect of mechanical surface hardening on the low-cycle fatigue strength of titanium alloys. *Metal Science and Heat Treatment*. 1971. V. 13, Iss. 12. P. 1038-1040. doi.org/ 10.1007/bf00665002
3. Ivanova V.S. *Razrushenie metallov* [Fracture of metals]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1979. 166 p.
4. Sulima A.M., Shulov V.A., Yagodkin Yu.D. *Poverkhnostnyy sloy i ekspluatatsionnyye svoystva detaley mashin* [Surface layer and operating properties of machine parts]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1988. 240 p.

### About the authors

**Sazonov Michael Borisovich**, Candidate of Science (Engineering), associate Professor of the Department of Engine Production Technology, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: [sazonov.mihail.56@yandex.ru](mailto:sazonov.mihail.56@yandex.ru). Area of Research: machining of materials.

**Solovatskaya Ljudmila Vladimirovna**, senior teacher the Department of Engine Production Technology, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: [lyud.kiselewa@yandex.ru](mailto:lyud.kiselewa@yandex.ru). Area of Research: machining of materials.