

## МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССА УПРОЧНЕНИЯ ПРИ ППД

© 2011 А. Н. Волков, М. Б. Сазонов, К. Ю. Машиннов

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

Рассмотрен способ контроля дробеударных методов ППД. Показано, что контроль процесса упрочнения деталей из титановых сплавов возможен по деформационному прогибу пластин из углеродистых сталей. В качестве критерия оценки напряжённо-деформированного состояния поверхностного слоя может быть использована интенсивность экзоэлектронной эмиссии поверхности обработанной детали.

*Упрочнение, деформация, контроль, обработка микрошариками, экзоэлектронная эмиссия, шероховатость, наклён, остаточные напряжения.*

Основным направлением в развитии дробеударных методов упрочнения является создание производительного и надежного оборудования, обеспечивающего высококачественный процесс поверхностного пластического деформирования. Одним из путей повышения надежности 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  $70 \times 20 \times 1,2$  мм, изготовленных из полос углеродистой стали У8А путем вальцевания или шлифования с последующей термообработкой до  $HRC = 45 \dots 50$ .

Эти пластины применяются при упрочнении деталей из различных материалов, в том числе и из титанового сплава ВТ9. Можно предположить, что ввиду различия упругих и пластических свойств материалов и разной склонности к упрочнению деформация их во времени будет протекать с различной скоростью и интенсивностью. При наибольшем прогибе контрольной пластины, соответствующему порогу насыщения поверхностного слоя пластическими деформациями и наибольшему уровню в нем 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. В последнем случае это может привести к её ускоренному усталостному разрушению.

Для проверки этого предположения применительно к сплаву ВТ9 были проведены экспериментальные исследования деформаций и остаточных напряжений, возникающих при упрочнении контрольных пластин из стали У8А и сплава ВТ9 на дробеударной установке микрошариками диаметром  $0,1 \dots 0,3$  мм. Изменение деформационного прогиба пластин по времени показано на рис. 1.

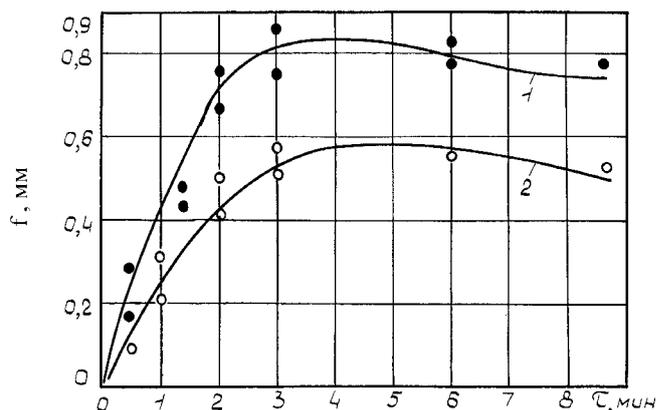


Рис. 1. Изменение деформационного прогиба  $f$  контрольных пластин после обработки микрошариками в зависимости от времени упрочнения  $\tau$ :

1 – сплав ВТ9; 2 – сталь У8А; ● – 1; ○ – 2

Как видно из рисунка, характер изменения прогиба пластин из ВТ9 (1) и У8А (2) одинаков. Вначале происходит линейное нарастание прогиба с несколько большей интенсивностью для титанового сплава, затем

оно замедляется и при  $\tau = 3 \dots 4$  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 счет перенаклепа.

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 различных 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).

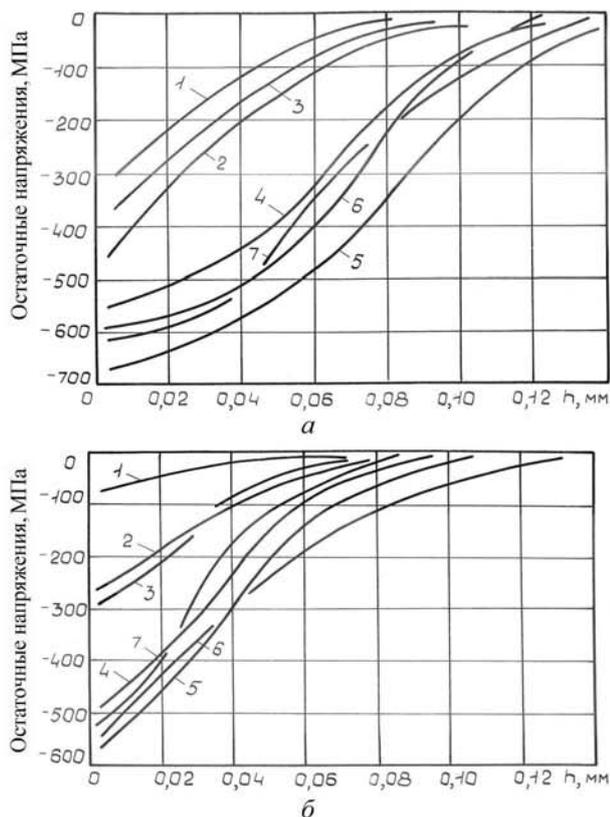


Рис. 2. Изменение остаточных напряжений по глубине  $h$  в контрольных образцах из стали У8А (а) и сплава ВТ9 (б) при ОМШ ( $V = 46$  м/с,  $d_{ш} = 0,1 \dots 0,2$  мм) с различным временем упрочнения  $\tau$ :

$\tau = 0,5$  мин (1); 1 мин (2); 1,5 мин (3); 2 мин (4); 3 мин (5); 6 мин (6); 9 мин (7)

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 перенаклепу. Таким образом, в обоих случаях остаточные напряжения достигают наибольших значений при времени упрочнения, равным 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.

Однако 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.

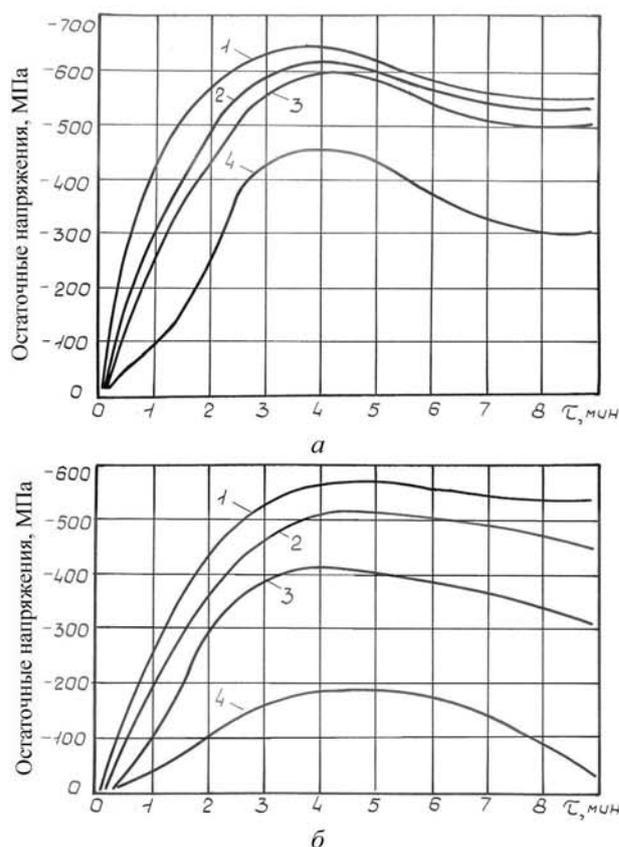


Рис. 3. Изменение остаточных напряжений от времени обработки  $\tau$  в контрольных образцах из стали У8А (а) и сплава ВТ9 (б) при ОМШ ( $V = 46$  м/с,  $d_{ш} = 0,1 \dots 0,2$  мм) на глубине  $h$ : 0,005 мм (1); 0,015 мм (2); 0,03 мм (3); 0,06 мм (4)

Одним из показателей состояния поверхностного слоя является его энергетический уровень. Аккумуляция энергии внешнего воздействия при различных видах обработки, а также образование при деформации напряженности в кристаллической решетке и структурных дефектов обуслов-

ливают повышение внутренней потенциальной энергии в поверхностных слоях деталей, которое сопровождается 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 пленки. 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.

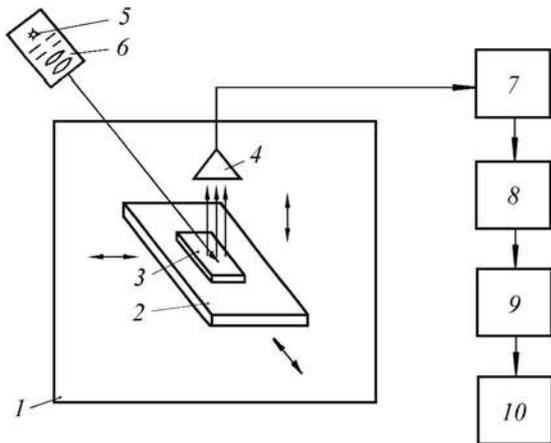


Рис. 4. Схема установки для регистрации экзоэлектронной эмиссии

В вакуумной камере 1 располагается координатный столик 2, на нем крепится испытуемый образец 3 и детектор электронов 4, в качестве которого использовался вторичный электронный умножитель (ВЭУ). Эмиссия стимулируется нефильтрованным ультрафиолетовым светом от дейтериевой лампы 5 типа ЛД через систему диафрагм и кварцевых линз 6. Для нормальной работы ВЭУ в счетном режиме необходимо вакуумирование измерительной камеры до остаточного давления  $10^{-3}$  Па. Чтобы надежно регистрировать слабые

эмиссионные токи, необходимо высокое усиление выходного сигнала ( $10^{10} \dots 10^{12}$ ). Такой коэффициент усиления реализуется при использовании ВЭУ, равный  $10^7$ , совместно с комплексом электронной аппаратуры, состоящей из предусилителя 7, импульсного усилителя 8, дискриминатора 9 и регистратора 10 (цифрового индикатора). Количественно ЭЭЭ оценивалась средней интенсивностью  $J_{\text{имп/с}}$  экзоэлектронной эмиссии.

В табл. 1 и на рис. 5, 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.

Из рисунков видно, что величина интенсивности ЭЭЭ поверхностного слоя существенно зависит от напряженно-деформированного и геометрического состояния поверхностного слоя.

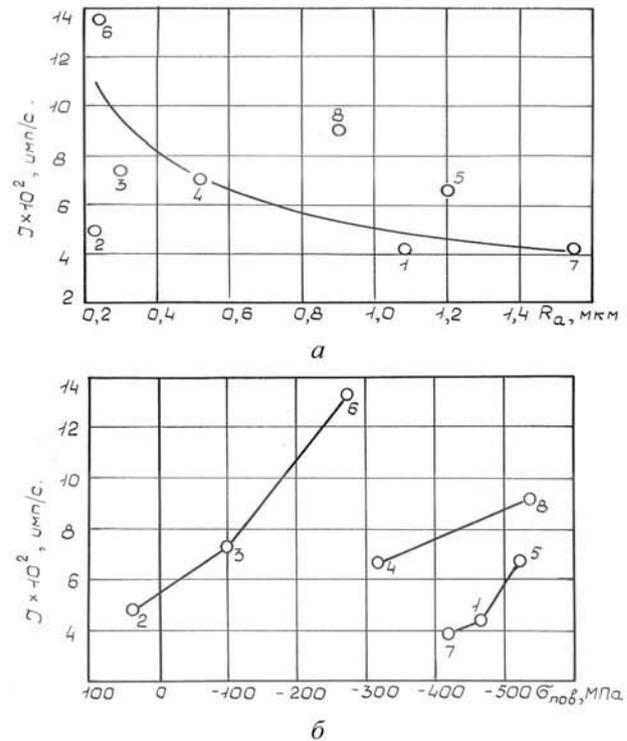


Рис. 5. Зависимость интенсивности экзоэлектронной эмиссии  $J$  от шероховатости  $R_a$  (а) и остаточных напряжений  $\sigma_{\text{пов}}$  (б)

При увеличении шероховатости  $R_a$  от 0,2 до 1,6 мкм (рис. 5,а) интенсивность ЭЭЭ имеет тенденцию к снижению, что, повидимому, связано с большим рассеиванием эмиссии электронов. Однако наблюдается

разброс данных, который можно объяснить значительным влиянием разного уровня наклепа (остаточных напряжений) на повышение общего уровня внутренней энергии и соответствующего увеличения экзоэмиссии

при различных видах упрочняюще-отделочной обработки. Это хорошо подтверждается сопоставлением интенсивности ЭЭЭ на образцах 2, 3 и 6-й серий.

Таблица 1. Зависимость интенсивности экзoeлектронной 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

При одинаковом уровне шероховатости  $Ra = 0,2$  мкм образцов 2-й и 6-й серий интенсивность образца 6-й серии ( $\sigma_{пов} = -280$  МПа) значительно больше, чем у образцов 2-й серии ( $\sigma_{пов} = +50$  МПа), у образцов 3-й серии с небольшим упрочнением ( $\sigma_{пов} = -100$  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 ( $\sigma_{пов} = -540$  МПа и  $-310$  МПа). На меньшую разницу интенсивности ЭЭЭ образцов 4-й и 8-й серий, имеющих сравнительно большое отличие по остаточным напряжениям, накладывает свой отпечаток более высокий уровень шероховатости образца 8-й серии.

На рис.6 показана связь изменения предела выносливости с интенсивностью ЭЭЭ. С увеличением интенсивности ЭЭЭ предел выносливости образцов возрастает по линейной зависимости при сравнительно небольшом разбросе данных. Это можно объ-

яснить тем, что и интенсивность ЭЭЭ, и предел выносливости возрастают с увеличением степени упрочнения и остаточных напряжений сжатия поверхностного слоя и уменьшением шероховатости поверхности. Полученные результаты позволяют сделать вывод о функциональной связи между пределом выносливости и интенсивностью ЭЭЭ.

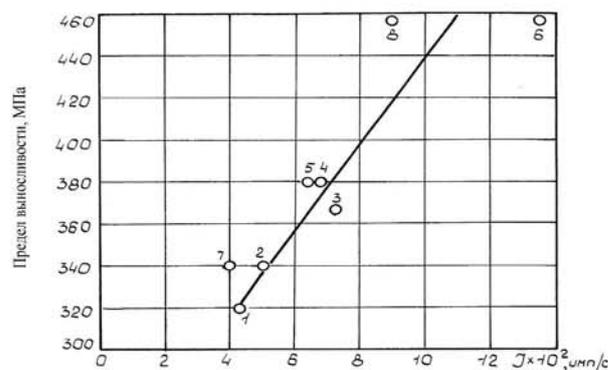


Рис. 6. Зависимость предела выносливости от уровня интенсивности экзoeлектронной эмиссии  $J$  образцов из сплава ВТ9, обработанных на различных режимах

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

Проведенные 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 на-

пряженно-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.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки) на основании постановления Правительства РФ №218 от 09.04.2010.

## CONTROL METHODS OF HARDENING PROCESS IN THE TIME OF SPD

©2011 A. N. Volkov, M. B. Sazonov, K. Yu. Mashinnov

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov  
(National Research University)

Control process of shotimpact methods SPD is considered. Control of hardening process of pieces from titanic alloys is possible by strain deflection of plates from carbon steels is indicated. The intensity of exoelectronic emission of the surface of finished part can be utilized in the capacity of assessment criterion of stressed – distorted state of superficial layer.

*Hardening, deformation, control, microball treatment, exoelectronic emission, roughness, cold working, residual stresses.*

### Информация об авторах

**Волков Александр Николаевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры механической обработки материалов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел. (846) 267-45-73; (846) 267-45-74. E-mail: [fdla@ssau.ru](mailto:fdla@ssau.ru). Область научных интересов: механическая обработка материалов.

**Сазонов Михаил Борисович**, кандидат технических наук, доцент кафедры механической обработки материалов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел. (846) 267-45-73; (846) 267-45-74. E-mail: [fdla@ssau.ru](mailto:fdla@ssau.ru). Область научных интересов: механическая обработка материалов.

**Машиннов Константин Юрьевич**, инженер кафедры механической обработки материалов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел. (846) 267-45-73; (846) 267-45-74. E-mail: [fdla@ssau.ru](mailto:fdla@ssau.ru). Область научных интересов: механическая обработка материалов.

**Volkov Alexander Nikolaevich**, Candidate in Engineering Science, associate Professor, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: (846) 267-45-74. E – mail: [fdla@ssau.ru](mailto:fdla@ssau.ru). Area of research: machining of materials.

**Sazonov Michael Borisovich** - Candidate in Engineering Science, associate Professor, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: (846) 267-45-74. E – mail: [fdla@ssau.ru](mailto:fdla@ssau.ru). Area of research: machining of materials.

**Mashinnov Konstantin Yuryevich**, engineer, the chair of Materials Machining, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: (846) 267-45-74. E – mail: [fdla@ssau.ru](mailto:fdla@ssau.ru). Area of research: machining of materials.