

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ И СВЕТООТРАЖАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТОНКОГО ЛИСТА И ЛЕНТ

Шкурупий В. Г., Новиков Ф. В., докт. техн. наук  
(Харьковский национальный экономический университет)

*В работе приведены результаты экспериментальных исследований параметров шероховатости и оптических характеристик обработанных поверхностей деталей из тонкого листа и лент*

При практическом использовании деталей из тонкого листа и лент имеют место случаи снижения их эксплуатационных свойств в связи с возникновением температурных деформаций от светового воздействия [1, 5]. Это требует создания на деталях светоотражательных поверхностей в целях снижения температуры их нагрева и температурных деформаций. Эффективным решением данной проблемы является применение финишных методов механической обработки. При этом теоретически установлено, что формирование оптических характеристик поверхности обусловлено параметрами шероховатости обработки: отношением  $R_a / R_{max}$  и критерием шероховатости  $F' = 1 - R_a / R_{max}$  [1]. Целью настоящей работы является экспериментальное исследование взаимосвязи параметров шероховатости с оптическими характеристиками поверхностей, обработанных различными методами механической обработки.

Исследования проводились на образцах из различных материалов: АМг3, АМг4, АМг6, 36НХТЮ, БрБ2, БрБНТ 1,9, БрБНТ 1,7, ВТ14.

Точение образцов из алюминиевых сплавов осуществляли резцами из быстрорежущей стали и твердых сплавов (ВК3, ВК4) с применением масляной СОЖ (ОСМ-3). Тонкое точение образцов из алюминиевых сплавов осуществляли резцом из природного алмаза без СОЖ с режимом: скорость резания 400 м/мин; подача 0,02 мм/об; глубина резания 0,01 мм. Обработку титановых сплавов выполняли резцами, оснащенными пластинками из твердого сплава ВК8. Геометрия резцов оставалась постоянной и характеризовалась следующими параметрами: передний и задний углы  $\gamma = \alpha = 10^\circ$ , главный и вспомогательный углы в плане:  $\varphi = 90^\circ$ ,  $\varphi_1 = 15^\circ$ , угол наклона режущей кромки  $\lambda = 0$ , радиус при вершине  $R = 2$  мм, радиус округления режущего лезвия  $\rho = 0,05$  мм.

Фрезерование образцов производили на горизонтально-фрезерном станке мод. 6М82 (встречное фрезерование) с охлаждением эмульсией. Фреза – цилиндрическая прямозубая из быстрорежущей стали Р6М5 диаметром 60 мм, число зубьев 16,  $\gamma = \alpha = 10^\circ$ .

Шлифование образцов осуществляли абразивными кругами с характеристикой 24А 16 М2 8К5/ПСС 40 15 на плоскошлифовальном станке мод. 372М с охлаждением эмульсией.

Для выглаживания плоских и цилиндрических поверхностей были изготовлены специальные приспособления с использованием сменных наконечников из поликристаллического синтетического сверхтвёрдого материала АСПК (нормаль ВНИИАЛМАЗ ОН-037-103-67) и шаров из стали ШХ-15 диаметром 5...8 мм, которые могут устанавливаться на стол фрезерного или токарного станка. Технические характеристики приспособления для вибровыглаживания: частота колебаний инструментальной головки 0...5 кГц; форма колебаний – синусоидальная; амплитуда колебаний 0...7 мм; радиальное усилие 0...2,5 Н.

Режимы обработки при выглаживании поверхностей образцов из алюминиевых сплавов (наконечники из АСПК с радиусом 3 мм): скорость выглаживания 80...100 м/мин; подача 0,04 мм/об; радиальное усилие 1,2 Н.

Абразивное полирование образцов из алюминиевых, хромоникелевых и медно-бериллиевых сплавов производили на полировальных станках фетровыми и войлочными кругами с наклеенным абразивным зерном и жидкой суспензией, а также на виброполировальном станке абразивной пастой на стеклянном притире. Для полирования использовали абразивную суспензию, состоящую из карбида кремния и электрокорунда зернистостью 1...3 мкм, дистиллированной воды и добавок сульфаминовых соединений типа ОП-10. Обработку производили также пастами на основе окиси хрома и алмазного микропорошка АСМ 2/1 и АСМ 3/2.

**Влияние методов финишной механической и физико-технической обработки на шероховатость и оптические характеристики поверхностей деталей из тонкого листа и лент.** Первоначально были выполнены измерения и анализ значений параметров шероховатости поверхности и ее оптических характеристик на фрезерованных, шлифованных и полированных образцах из стали 40Х ГОСТ 4543-71 (эталон чистоты). В табл. 1 приведены результаты измерений высотных параметров шероховатости поверхности  $R_a$  и  $R_z$ , а также коэффициента отражения  $\rho_s$ . Разброс значений высотных параметров шероховатости поверхности  $R_a$  и  $R_z$ , а также коэффициента отражения  $\rho_s$  при фрезеровании обусловлен интервалами изменения параметров режимов обработки: скорость резания  $V$  от 3 до 20 м/мин; подача на зуб  $S_z$  от 0,05 до 0,15 мм/зуб.

Таблица 1

Значения высотных параметров шероховатости и коэффициента отражения  $\rho_s$  поверхностей образцов из стали 40Х ГОСТ 4543-71 после обработки резанием

Наименование операции	Параметры шероховатости поверхности		Коэффициент отражения $\rho_s$
	$R_a$ , мкм	$R_z$ , мкм	
Фрезерование	11,05...0,52	40...1,4	0,20...0,25
Шлифование предварительное	0,4...0,35	-	0,25...0,31
Шлифование окончательное	0,2...0,16	-	0,48...0,51
Полирование	-	0,4...0,16	0,72...0,74

В результате анализа результатов измерений установлено, что при фрезеровании, в зависимости от условий обработки, параметры шероховатости  $R_a$  и  $R_z$  изменяются в довольно больших пределах (в 15 – 20 раз). Вместе с тем, коэффициент отражения  $\rho_s$  остается почти неизменным, это указывает на то, что коэффициент отражения  $\rho_s$  практически не зависит от высотных параметров шероховатости поверхности  $R_a$  и  $R_z$ . Полученный результат хорошо согласуется с теоретическими выводами [4, 5].

Как следует из табл. 1, переход от фрезерования к шлифованию и полированию позволяет уменьшить параметры шероховатости  $R_a$  и  $R_z$ . При этом увеличивается коэффициент отражения  $\rho_s$ . Следовательно, применение абразивной обработки (в отличие от лезвийной) позволяет уменьшить шероховатость и повысить светоотражательную способность обработанной поверхности. На первый взгляд может показаться, что увеличение значений коэффициента отражения  $\rho_s$  при переходе от лезвийной к абразивной обработке связано с уменьшением высотных параметров шероховатости  $R_a$  и  $R_z$ . В действительности это не так. В этом можно убедиться, анализируя результаты экспериментальных исследований, полученные на основе профилограмм поверхностей образцов листового проката из сплава АМг6 после различных видов обработки и приведенные в табл. 2.

Таблица 2

Значения  $R_a / R_{max}$ ,  $F'$ , коэффициентов отражения  $\rho_s$ , поглощения  $A_s = 1 - \rho_s$  и излучения  $\varepsilon$ , а также отношения  $A_s / \varepsilon$  после обработки

Метод обработки	$R_a / R_{max}$	$F'$	$\rho_s$	$A_s$	$\varepsilon$	$A_s / \varepsilon$
Тонкое точение алмазным инструментом	0,06	0,94	0,81	0,19	0,07	2,71
Выглаживание шаром Ø6 мм из стали ШХ15	0,05	0,95	0,9	0,1	0,05	2,0
Абразивное полирование (окись хрома М3)	0,075	0,925	0,7	0,3	0,06	5,0
Точение	0,1	0,9	0,51	0,49	0,1	4,9
Фрезерование	0,115	0,885	0,54	0,46	0,16	2,87
Исходная поверхность (прокат)	0,104	0,896	0,5	0,5	0,15	3,33
Гидроабразивная или обработка металлической дробью	0,135	0,865	0,37	0,63	0,31	2,03

Теоретически установлено [4, 5], что с увеличением критерия шероховатости  $F' \rightarrow 1$  коэффициент излучения  $\varepsilon$  уменьшается, а коэффициент отражения  $\rho_s$  увеличивается. Данная закономерность вытекает из табл. 2. Так, наименьшее значение  $\varepsilon = 0,05$  и наибольшее значение  $\rho_s = 0,9$  достигается для наибольшего значения критерия шероховатости  $F' = 0,95$  (после выглаживания). Наибольшее значение  $\varepsilon = 0,31$  и наименьшее значение  $\rho_s = 0,37$  достига-

ется для наименьшего значения критерия шероховатости  $F' = 0,865$  (гидроабразивная или обработка металлической дробью).

Таким образом, из табл. 2 четко следует, что чем больше значение критерия шероховатости  $F'$ , тем меньше значение коэффициента излучения  $\varepsilon$  и больше значение коэффициента отражения  $\rho_s$ . В табл. 2 также приведены рассчитанные по зависимости  $A_s = 1 - \rho_s$  значения коэффициента поглощения  $A_s$ . Коэффициент поглощения тем меньше, чем меньше значения  $R_a / R_{max}$  и больше критерий шероховатости  $F'$ .

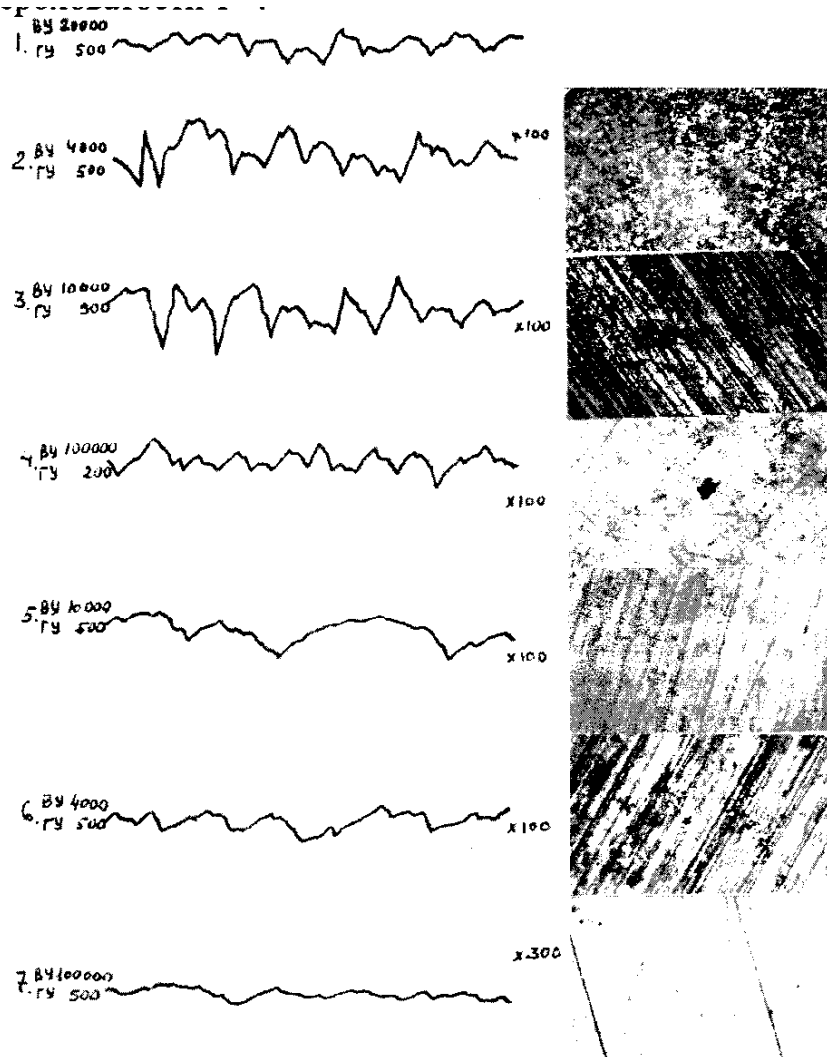


Рис. 1. Профилграммы и фотографии поверхностей образцов из сплава АМг6 после различных методов обработки: 1 прокат; 2 гидроабразивная обработка; 3 точение; 4 абразивное полирование; 5 выглаживание; 6 фрезерование; 7 тонкое точение алмазным инструментом.

В табл. 2 приведены значения и отношения параметров шероховатости поверхности  $R_a / R_{max}$ . Как видно, наибольшему значению критерия шероховатости  $F' = 0,95$  соответствует фактически наименьшее значение соотношения  $R_a / R_{max} = 0,05$ , а наименьшему значению  $F' = 0,865$  соответствует наибольшее значение  $R_a / R_{max} = 0,135$  (гидроабразивная или обработка металлической дробью). Из этого можно сделать вывод, что значения коэффициентов излучения и

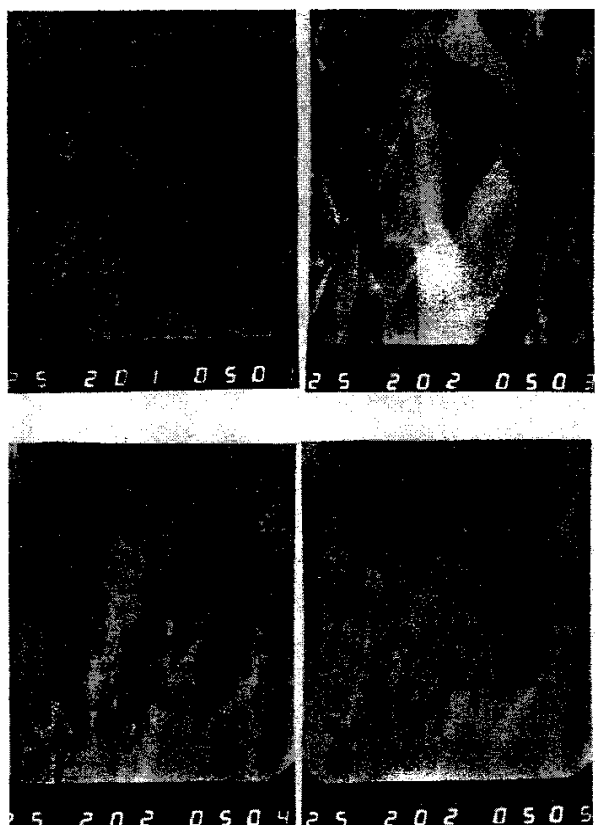


Рис. 2. Фотографии поверхностей после струйно-абразивной обработки электрокорундом М100: увеличение 60 (а); 1200 (б); 2000 стереопара 7° (в, г).

отражения обусловлены изменением критерия шероховатости  $F'$  и соответственно соотношения  $R_a / R_{max}$ , а не высотных параметров шероховатости поверхности. Следовательно, формирование оптических характеристик поверхностей связано с формой микронеровностей поверхности, а не с высотой ее профиля шероховатости. Это согласуется с теоретическими данными [1, 4, 5].

Следует подчеркнуть, что критерий шероховатости  $F'$ , определяемый на основе значений параметров шероховатости, полученных с использованием профилометра – профилографа мод. 252, лишь частично отражает форму микронеровностей (рис 1, рис. 2), соизмеримых с длинами волн падающего солнечного излучения, так как разрушения от воздействия иглы профилометра соизмеримы с этими микронеровностями. В ре-

зультатах экспериментов наблюдается соответствие интенсивности изменения критерия шероховатости  $F'$  изменению отражательной способности  $\rho_s$  обработанных поверхностей для соответствующего технологического маршрута. При каждом методе обработки можно выделить несколько узких интервалов распределения размеров микронеровностей, часть которых соответствует диапазону длин волн падающего излучения. По-видимому, с увеличением высоты неровностей на обработанной поверхности значения критерия шероховатости  $F'$  уменьшаются, начинает сказываться влияние взаимного расположения уклонов неровностей, значительно уменьшаются углы и радиусы. Так, для поверхностей после гидроабразивной обработки характерно наличие неровностей различных порядков малости, а углы между уклонами (радиус ощупывающей иглы профилографа 10 мкм) уменьшаются (рис. 3, рис. 4). В поверхностном слое после обработки наблюдается закрепление абразивных зерен, что должно оказывать влияние на излучательные свойства поверхностей (рис. 5, рис. 6). На рис. 5 видны следы обработки закрепленными в полировальнике зернами и сами закрепленные в поверхности образца зерна. На рис. 6 видны вскрытые в результате полирования места шаржирования зерен в поверхность образца.

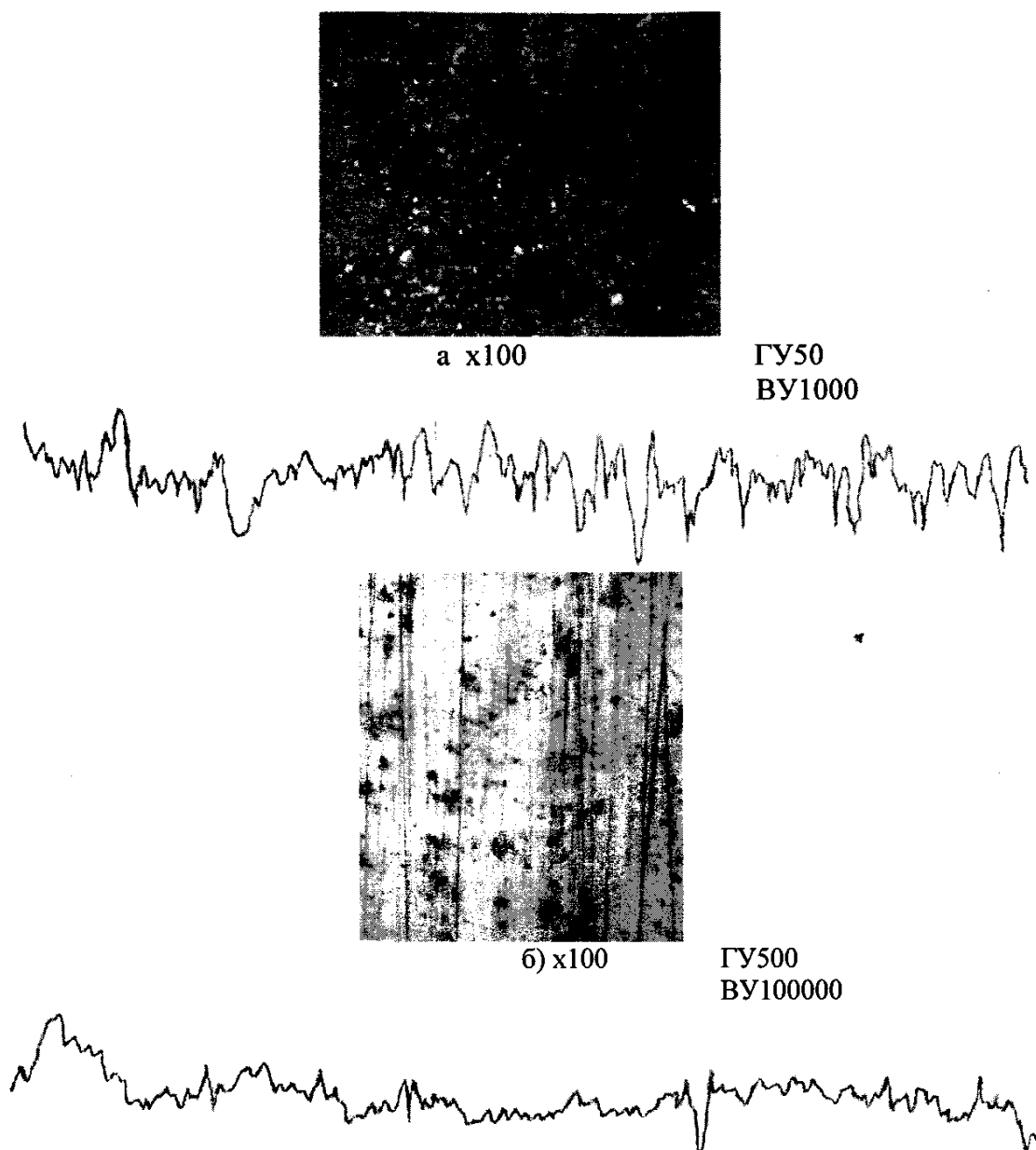


Рис. 3. Фотографии и профилограммы поверхностей образцов из сплава АМг4 после различных методов обработки: гидроабразивная обработка (а); абразивное полирование пастой АСМ2/1 (б) с режимом: окружная скорость полировальника 50 м/с; удельное давление 500 кПа.

Точение алмазным инструментом поверхностей алюминиевых сплавов, при достижении высокой отражательной способности, предпочтительно перед механическим полированием. Повышению отражательной способности поверхностей, обработанных точением алмазным инструментом (резцом из природного алмаза без применения СОЖ), способствуют: благоприятное сочетание физико-химических свойств природного алмаза и обрабатываемой поверхности, снижение интенсивности воздействия химически активных веществ при отсутствии СОЖ. Это и приводит к уменьшению количества различных по характеру неоднородностей. Такие поверхности имеют менее развитую структуру, чем после абразивного полирования.

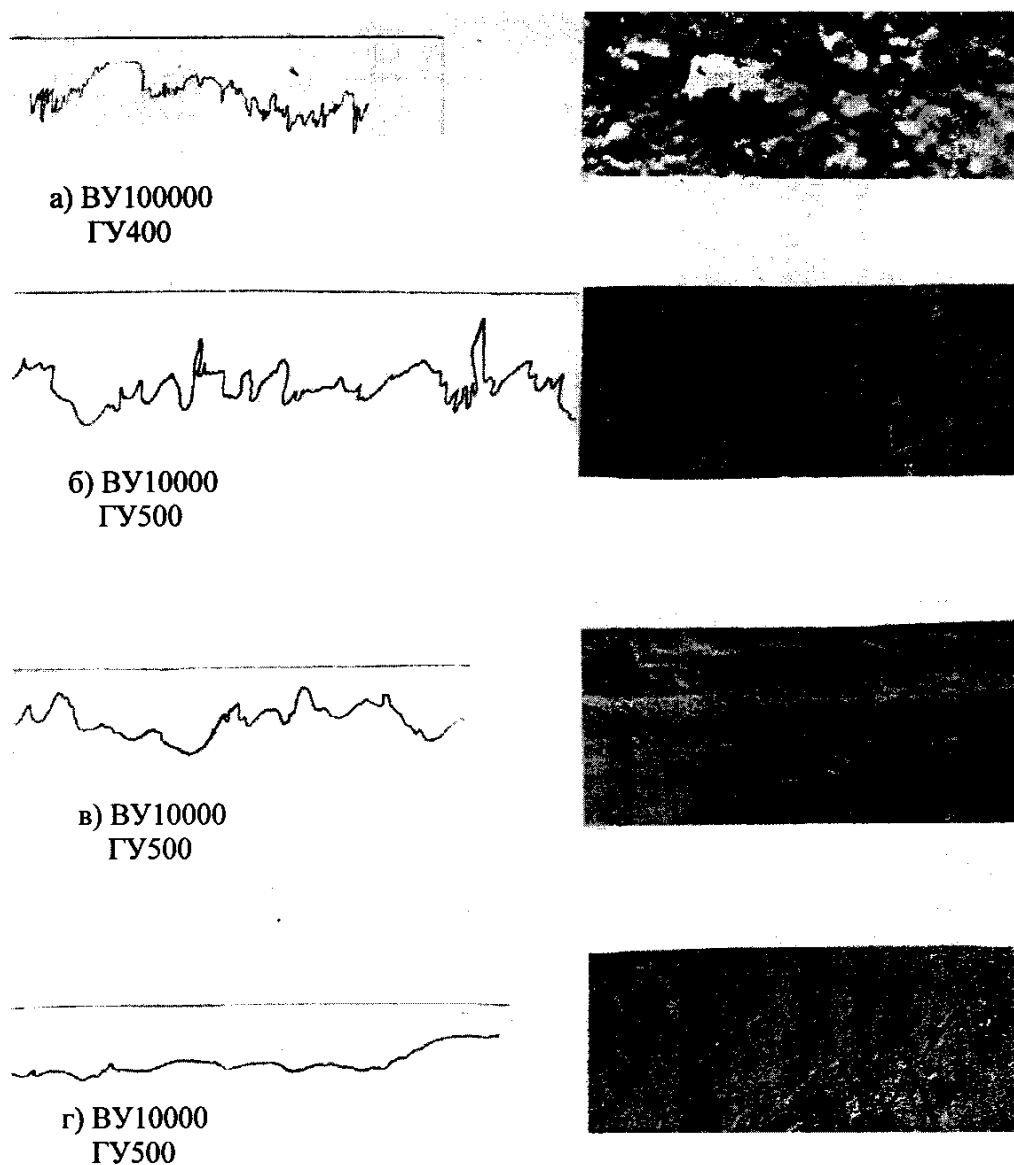
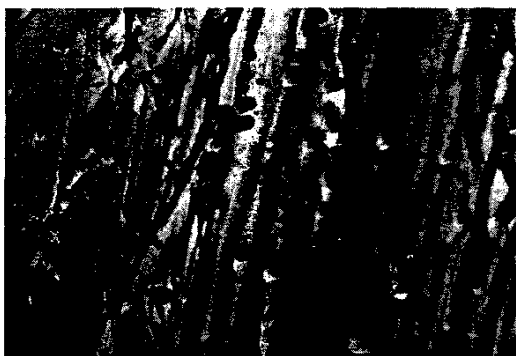


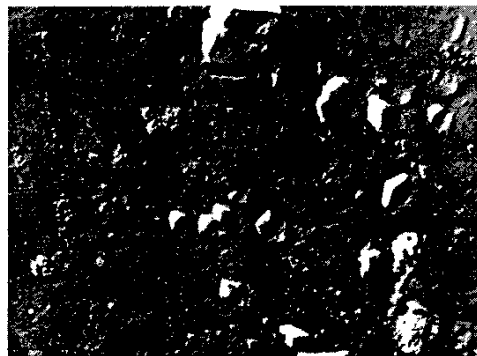
Рис. 4. Фотографии и профилограммы поверхностей образцов из сплава 36НХТЮ после абразивного полирования: до обработки (а); окись алюминия МЗ (б); окись хрома МЗ (в) и алмазная паста АСМ2/1 (г); режим обработки: окружная скорость полировальника 50 м/с; удельное давление 500 кПа.

Изучение профилограмм и фотографий поверхности различных увеличений (рис. 1, рис. 3) позволило установить на всех стадиях обработки изменение как высоты неровностей, так и их формы, причем окисление поверхности происходит в меньшей степени при точении, выглаживании и фрезеровании. В случае фрезерования изменение режимов обработки и соответствующих высотных параметров шероховатости ( $R_z = 2-45$  мкм) не оказало существенного влияния на отражательную способность. Это можно объяснить соответствием физико-химических свойств обработанных поверхностей и наличием аналогичных неоднородностей геометрического характера, соизмеримых с длинами волн падающего излучения.



x10000

Рис. 5. Фотографии обработанных поверхностей образцов из сплава марки 36НХТЮ: абразивным составом ЭМ7 с режимом: окружная скорость полировальника 50 м/с; удельное давление 500 кПа (а); после абразивного и последующего электрохимического полирования при плотности тока 50 А/дм<sup>2</sup>; напряжении 24 В; фосфорно-хромовый электролит; температура электролита 50<sup>0</sup>С; продолжительность полирования 3 мин (б).



x 10000

Рис. 6. Фотография поверхности образца из сплава 36НХТЮ после абразивного и последующего электрохимического полирования с режимом: плотность тока 50 А/дм<sup>2</sup>; напряжение 24 В; фосфорно-хромовый электролит; температура электролита 50<sup>0</sup>С; продолжительность полирования 3 мин.

Уменьшение отражательной способности  $\rho_s$  и увеличение излучательной  $\varepsilon$  наиболее эффективно обеспечивается в случае применения гидроабразивной обработки. Этому способствует повышенная активность поверхности с ее наклепом, развитым рельефом и окисной пленкой.

Аналогичные результаты наблюдаем при обработке поверхности алюминиевого сплава АМг4 (табл. 3). Так, уменьшение отношения параметров шероховатости  $R_a/R_{max}$  (обусловленное различными методами обработки) соответствует увеличению критерия шероховатости  $F'$ , коэффициента отражения  $\rho_s$  и уменьшению коэффициентов поглощения  $A_s$  и излучения  $\varepsilon$ . При этом отношение  $R_a/R_{max}$  принимает весьма малые значения (0,033 для абразивного полирования), соответственно  $R_{max}/R_a$  принимает относительно большие значения – 30,3. Это хорошо согласуется с полученными теоретическими результатами [1, 5], согласно которым отношение  $R_a/R_{max}$  может изменяться в пределах 0...0,29.

Экспериментально установлено (табл. 3), что наибольшие значения коэффициента отражения поверхности  $\rho_s$  достигаются после тонкого точения алмазным инструментом, выглаживания шаром и абразивного полирования.

Эти методы обработки также обеспечивают наименьшие значения параметров шероховатости  $R_a$ ,  $R_a/R_{max}$  и наибольшие значения критерия шероховатости  $F'$ . Из этого следует, что для создания высокосветоотражательных поверхностей (при обеспечении зеркального характера отражения) жестких деталей из алюминиевых и медных сплавов более эффективно применять методы алмазного точения и выглаживания, а для деталей из тонкого листа и лент – аб-



разивное полирование, позволяющее уменьшить силовую напряженность процесса обработки. Для создания высокосветоотражательных матовых поверхностей (при обеспечении диффузного характера отражения, для которого отношение  $A_s/\varepsilon$  принимает относительно небольшие значения) эффективно применять точение и струйно-абразивную обработку, табл. 3. Результаты исследований указывают на возможность изменения отражательной способности поверхностей (после обработки резанием) в значительных пределах (40–87 %), а излучательной - в незначительных (5– 16%).

Таблица 3

Значения  $R_a$ ,  $R_a / R_{max}$ ,  $F'$ , коэффициентов отражения  $\rho_s$ , поглощения  $A_s = 1 - \rho_s$  и излучения  $\varepsilon$ , а также отношения  $A_s / \varepsilon$  и КРП после обработки образцов из проката алюминиевого сплава АМг4

Метод обработки	$R_a$ , мкм	$R_a / R_{max}$	$F'$	$\rho_s$	$A_s$	$\varepsilon$	$A_s / \varepsilon$	КРП, мВ
Исходная поверхность (прокат)	0,35	0,104	0,896	0,4	0,6	0,16	3,75	890
Фрезерование	1,6	0,11	0,89	0,47	0,53	0,15	3,53	100
Струйно-абразивная обработка	0,9	0,16	0,84	0,4	0,6	0,3	3,75	260
Точение	0,56	0,09	0,91	0,48	0,52	0,07	1,42	1050
Выглаживание шаром	0,1	0,07	0,93	0,8	0,2	0,05	4,0	1020
Абразивное полирование	0,1	0,033	0,967	0,75	0,25	0,06	4,16	120
Тонкое точение алмазным инструментом	0,1	0,047	0,953	0,87	0,13	0,07	1,36	1200

Результаты исследований подтверждают преимущество точения алмазным инструментом (особенно из природного алмаза) перед абразивным полированием поверхностей с высокой отражательной способностью (рис. 1).

Повышению отражательной способности поверхностей, обработанных точением, способствует благоприятное сочетание физико-химических свойств природного алмаза и материала обрабатываемой поверхности, снижение интенсивности воздействия химически активных веществ, что приводит к уменьшению различного характера неоднородностей. Окисление поверхности при точении происходит в меньшей степени, чем при абразивном полировании (рис. 1), что подтверждают и значения работы выхода электронов. По-видимому, при полировании поверхность адсорбирует химически активные вещества, содержащиеся в абразивных составах, и кислород воздуха, что оказывает влияние на развитие химико-механических явлений, сопровождающих пластическое деформирование микро выступов поверхности. Процесс адсорбции должен интенсифицироваться при механическом снятии пленок окислов с поверхности,

что обеспечивается относительным перемещением полировальника и обрабатываемой поверхности. Локальное активное контактирование поверхностей полировальника и обрабатываемой поверхности обеспечивает срыв пленки окислов, ее образование, сопровождающееся адсорбцией химически активных веществ, и последующий срыв. В результате множества локальных воздействий происходит уменьшение высот неровностей, что подтверждается сглаживанием профиля шероховатости поверхности (рис. 1).

Значительные различия поверхностей после точения и полирования подтверждаются (табл. 3) оценкой работы выхода электронов (КРП). При равных значениях высотных параметров шероховатости поверхности ( $R_z = 0,05 \dots 0,08$  мкм) образцы из сплава АМг4 после полирования и точения имели отражательную способность 90% и 53% соответственно, излучательную - 7% и 8%, КРП - 1200 мВ и 120 мВ. После полирования, кроме следов абразивных зерен, на поверхности образцов иногда наблюдали большое количество мелких точек ("ряби"), что является, по-видимому, результатом взаимодействия в условиях повышенных температур органических компонентов полирующих составов, абразивных зерен и материала обрабатываемой поверхности. На поверхности, обработанной точением, наблюдали следы резца глубиной 0,2 мкм и шириной 60 мкм, уклоны микронеровностей относительно гладкие (рис. 1).

Рентгенографические исследования показывают, что после полирования поверхность деформирована в большей степени, и структуру поверхностного слоя можно представить схематически как конгломерат сильно раздробленных осколков зерен, среди которых встречаются и крупные осколки сильно деформированных зерен. После точения зерна более крупные с небольшими, в отдельных местах, включениями измельченных осколков. Меньшей степени деформации обработанной поверхности способствует более низкая теплонапряженность процесса точения алмазным инструментом, по сравнению с процессом полирования.

Снижение отражательной и увеличение излучательной способности наиболее эффективно обеспечивается струйно-абразивной обработкой. С увеличением высоты неровностей на обработанной поверхности значения фактора шероховатости уменьшаются (струйные методы обработки свободным абразивом отличает больший диапазон рассеивания размеров).

Контроль шероховатости обработанных поверхностей показал возможность непосредственного извлечения информации о форме неровностей при ощупывании иглой профилометра-профилографа. Для неровностей поверхности, соизмеримых с длинами волн собственного излучения, точность оценки повышается. Для большинства технологических операций окончательной обработки поверхностей форма неровностей, соизмеримых с длинами волн падающего излучения, частично будет определяться окислением поверхностного слоя в процессе обработки. Оценка формы таких неровностей контактными методами затруднена и не обеспечивает достоверных результатов, что подтверждается исследованием топографии на оптических и электронных микроскопах (рис. 2).

Физические и химические неоднородности поверхностного слоя после различных методов обработки отличаются не только природой, но и количе-

ством, размерами, о чем свидетельствует анализ спектральной отражательной способности (наблюдается характерный сдвиг максимумов отражательной способности по длинам волн и по интенсивности отражения), оценки работы выхода электронов (КРП) и шероховатости поверхности. Для каждого метода обработки можно выделить несколько узких интервалов распределения размеров неровностей, часть их размеров соответствует диапазону длин волн падающего излучения.

### Список литературы

1. Шкурупий В.Г. Повышение эффективности технологии финишной обработки светоотражательных поверхностей деталей из тонкого листа и лент. – Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Одесса: ОНПУ, 2006. – 21 с.
2. Шкурупий В.Г. Особенности анализа шероховатости поверхности, обработанной резанием // Резание и инструмент. – Харьков, 1982. – Вып.27. – С. 74-77.
3. Новиков Ф.В., Шкурупий В.Г. Исследования шероховатости поверхности при алмазно-абразивной обработке методами теории вероятности // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків, 2004. – № 44. – С. 140-149.
4. Новиков Ф.В., Шкурупий В.Г. Обоснование связи геометрических характеристик светоотражающих поверхностей штанг с отверстиями с их эксплуатационными свойствами // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства. – Харків: ХНТУСГ, 2005. – Вип. 33. – С. 294-301.
5. Новиков Ф.В., Шкурупий В.Г. Установление функциональных связей между параметрами шероховатости и оптическими характеристиками обработанной поверхности // Резание и инструмент в технологических системах: Межд. научн.-техн. сборник. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2005. – Вып. 68. – С. 312-318.