

4. Кожушко В. П. Применение профнастила при реконструкции и ремонте малых мостов / В. П. Кожушко, С. Н. Краснов, Е. С. Краснова // Вісн. Д. нац. ун-ту залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна. – Д., 2011. – Вип. 39 – с. 83 – 86.
5. Коваль М. П. Перспективи застосування сталевих профільованих настилів для влаштування плит проїзної частини автодорожніх мостів / Коваль М. П. // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава: ПолтНТУ, 2012. – Вип. 3 (33). – с. 100 – 106.
6. Беляева С. Ю. Экспериментальные исследования железобетонных плит, армированных стальным профилированным настилом // Зб. наук. праць Донбас. технічн. ун-ту. – Вип. 20. – Алчевськ: "Ладо" ДонГТУ, 2005. – с. 344 – 348.
7. Nelson. Standardkatalog Bolzenschweißen. – Gevelsberg, Nelson Bolzenschweiß-Nechnik GmbH & Co. KG. – 2001. – 35 s.
8. Боярский А.В. Эффективный профилированный настил для армирования композитных плит / Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – М., 2007. – Вып. 6 (101) – с. 28 – 30.
9. Беляева С. Ю. Міцність і деформативність залізобетонних плит, армованих сталевим профільованим настилом і поперечними анкерами : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.23.01 "Будівельні конструкції, будівлі та споруди" / С. Ю. Беляева. – Київ, 2006. – 20 с.
10. Коваль Т. І. Ефективність використання базальтової арматури для плит проїзної частини автодорожніх мостів // Строительство, реконструкция и восстановление зданий городского хозяйства: материалы III Международной научно-технической интернет-конференции. – Х.: ХНАГХ, 2012. – с. 259 – 261.
11. Коваль М. П. Принципи розрахунку залізобетонної плити проїзної частини автодорожніх мостів із незнімною опалубкою зі сталевого профільованого настилу / М. П. Коваль, І. О. Кондрюкова // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій. Збірник наукових праць – Львів: Каменярь, 2014. – Випуск 9. – С. 433 – 448.

А.В.ГОРИК, д-р техн. наук, С.Б.КОВАЛЬЧУК, канд. техн. наук, А.Н.БРИКУН

Полтавская государственная аграрная академия, г. Полтава, Украина

Р.Е.ЧЕРНЯК

ПАТ «АвтоКрАЗ», г. Кременчуг, Украина

### **Твердость и микроструктура поверхностного слоя элементов машин после дробеструйной обработки (результаты экспериментальных исследований)**

Состояние тонких поверхностных слоев изделия, служащих основанием для защитного покрытия в значительной мере зависит от качества защитного покрытия, что повышает надежность и долговечность деталей машин [1]. Нами проведены экспериментальные исследования, в ходе которых изучали структуру поверхностного слоя стальных образцов, обработанных струей дроби, используя методы оптической и электронной микроскопии. Исследования проводили на плоских образцах размерами 75x50x10 из стали марки 08сп, которые вырезали механическим способом из листового проката. В качестве абразивного материала для обработки образцов использовали дробь стальную колотую марки ДСК-17 номер 1 следующего химического состава:  $Si - 14...20\%$ ,  $C < 0,5\%$ ,  $Mn - 0,55\%$ ,  $P - 0,035\%$ ,  $S - 0,014\%$ , а остальное – железо.

Дробеструйную очистку производили в специальной защитной камере, оснащенной дробеструйным аппаратом нагнетательного типа со смесительной камерой, которая заканчивается штуцером для резиноканевого рукава с условным проходом диаметром 32мм. В качестве инструмента применяли дробеструйное сопло из минералокерамики, имеющим цилиндрическое отверстие диаметром 10мм.

Перед дробеструйной обработкой образцы подготавливали по принятой в химическом машиностроении технологии, согласно которой образцы подвергали термической обработке в режиме нормализационного отжига, который производили в муфельной печи. Для этого образцы укладывали на пол печи та-

ким образом, чтобы их поверхности не соприкасались, нагревали их до температуры  $(850 \pm 20)^\circ\text{C}$  со скоростью  $300\text{град}/\text{час}$  и выдерживали при этой температуре в течение  $20\text{ мин}$ . Затем охлаждали в атмосфере спокойного воздуха при температуре  $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ . После этого образцы устанавливали в магазин лабораторной установки, где производили дробеструйную очистку их поверхностей.

Ставилась задача выявить влияние режимов дробеструйной очистки на характер процесса стружкообразования и качество поверхности. Характер разрушения и деформации поверхностных слоев изучали на обработанных образцах в плане и в разрезе по глубине поверхностного слоя (изготавливали шлифы в поперечном сечении образца, то есть, в плоскости перпендикулярной обработанной поверхности). Для этого из обработанных плоских образцов вырезали штабики размерами  $20 \times 20 \times 10\text{ мм}$ , которые закрепляли в специальной оправе. Изготовление шлифов производили в соответствии с существующей методикой [2].

Шлифы изучали под оптическим металлографическим микроскопом МИМ-7 при различном увеличении. Изучение обработанных поверхностей под оптическим микроскопом не давало представления о микромеханизме разрушения поверхностных слоев в связи с тем, что предельно полезное увеличение составляло только 800. Следовательно, субмикрорельеф поверхности, оказывающий решающее влияние на производительность процесса и технологические свойства обработанных поверхностей, и связанный с механизмом пластической деформации и разрушения, не может быть изучен таким способом. Поэтому для изучения характера деформации и разрушения поверхностного слоя стальных изделий при различных параметрах дробеструйной обработки был использован метод электронной микроскопии. Преимущество электронной микроскопии заключается не только в большой разрешающей способности (минимальное разрешающее расстояние  $0,005 \dots 0,0008\text{ мкм}$ ) и большом полезном увеличении (до 200 000 раз), но и увеличенной глубине резкости, что позволяет наблюдать детали объекта, расстояние между которыми по высоте доходит до  $2\text{ мкм}$ .

Поверхность стальных экспериментальных образцов, обработанных абразивной струей дроби, исследовали с помощью универсального электронного микроскопа УЭМВ-100К. Для изучения структуры обработанных поверхностей использовали метод реплик.

Микротвердость поверхностных слоев после дробеструйной очистки определяли при помощи микротвердомера ПМТ-3 на поперечных срезах (шлифах) при нагрузке на индентор  $F = 0,5\text{ Н}$ .

Дальше изложены некоторые результаты металлографических исследований экспериментальных образцов, знание которых дает возможность влиять на качество обработанных поверхностей металлических деталей путем изменения технологических режимов.

Результаты металлографических исследований поверхностного слоя образцов из стали 08сп, обработанных дробеструйным факелом при различных режимах технологического процесса, говорят о том, что параметры дробеструйной очистки непосредственно влияют на микроструктуру, микротвердость, глубину наклепанного слоя и шаржирование обрабатываемой поверхности осколками дроби [3].

Микроструктура поверхностного слоя стали 08сп после нормализационного отжига и дробеструйной обработки при скорости атаки  $v = 100\text{ м}/\text{с}$ , времени воздействия струи  $t = 10\text{ с}$  и различных углах атаки поверхности  $\alpha$  приведена на рис. 1 для подачи дроби  $V_c = 30\text{ кг}/\text{мин}$ .

Рельеф (шероховатость) обработанной поверхности изменяется с изменением угла атаки, достигая наибольшей развитости в случае атаки под углом  $\alpha = 40 \dots 65^\circ$ , что соответствует эффективному диапазону углов при дробеструйной очистке.

При этом количество внедренных осколков дроби в обрабатываемую поверхность также изменяется. Наибольшему шаржированию подвергается поверхность, атакованная под углами  $\alpha = 75^\circ \dots 90^\circ$ . При таких углах атаки происходит изменение механизма разрушения поверхностного слоя – стружкообразования, который характеризуется преобладанием микрорезания при меньших углах атаки поверхности и усталостного разрушения поверхностного слоя при больших углах атаки [4]. Это приводит к тому, что осколки отдельных дробин не только остаются на поверхности, но и внедряются вглубь поверхностного слоя, где закрываются пластически деформированными микрообъемами металла.

С увеличением угла атаки  $\alpha$  от  $30^\circ$  до  $90^\circ$ , при тех же условиях, глубина наклепанного слоя также увеличивается, что следует из табл.1. Однозначных выводов по отношению влияния величины подачи дроби сделать не представилось возможным.

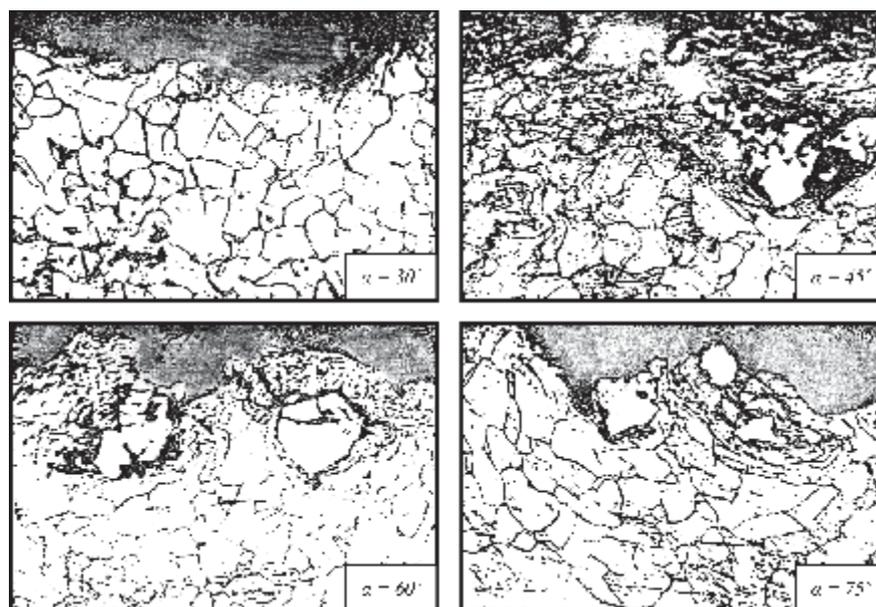


Рис.1 Микроструктура поверхностного слоя ( $\times 200$ ) стали 08сп после дробеструйной обработки

Таблица 1

Микротвердость феррита  $H_{50}$  ( $H/mm^2$ ) поверхностного слоя стали 08сп  
для различных углов атаки  $\alpha$  при  $v = 100 м/с$ ,  $t = 10с$

Подача дробы, кг/мин	Глубина наклепанного слоя, мкм	Угол атаки $\alpha$ , град.				
		30	45	60	75	90
30	20	2710	2710	2710	2710	2710
	40	2180	2480	2210	2300	2180
	60	2090	2360	2180	2180	1930
	80	1860	2360	2010	2010	1930
	100	1790	2090	1860	2010	1790
	120	1600	1860	1790	1930	1860
	140	–	1600	1660	1790	1790
	160	–	–	1600	1600	1600
20	20	2710	2600	2710	2600	2710
	40	2480	2270	2270	2360	2360
	60	2180	2040	2180	2270	2090
	80	2020	1930	2090	2180	2010
	100	1790	1790	2090	2180	1930
	120	1600	1730	1860	2090	1930
	140	–	1600	1730	1930	1860
	160	–	–	1600	1860	1720

Полученные численные результаты практически соизмеримы как при  $V_c = 30 кг/мин$ , так и при  $V_c = 20 кг/мин$ .

Можно только констатировать, что стабилизация глубины наклепанного слоя наступает при достижении значения угла атаки  $\alpha = 60^\circ$  при подачи дробы  $V_c = 30 кг/мин$ .

Увеличение скорости  $v$  атаки от 40 до 100 м/с при постоянном времени воздействия на поверхность дробеструйного факела ( $t = 10 с$ ) и подачи дробы  $V_c = 20 кг/мин$  приводит к более развитому микрорельефу обработанной поверхности и увеличению зоны проникновения осколков дробы в глубь металла. Это

следует со снимков, представленных на рис. 2, которые соответствуют углу атаки  $\alpha = 30^\circ$  и на рис. 3, которые соответствуют углу атаки  $\alpha = 60^\circ$ .

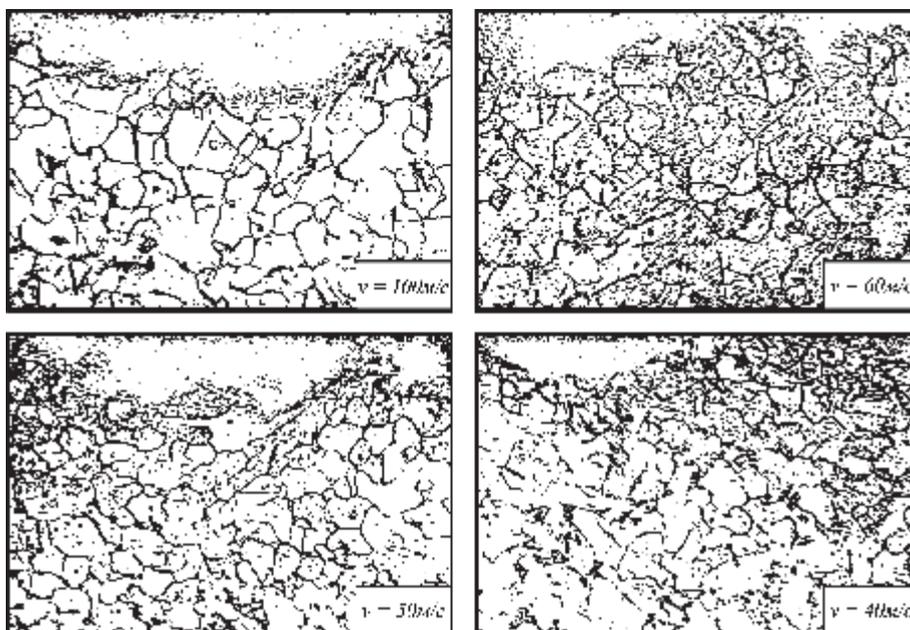


Рис.2. Микроструктура поверхностного слоя ( $\times 200$ ) стали 08сп после дробеструйной обработки под углом  $\alpha = 30^\circ$

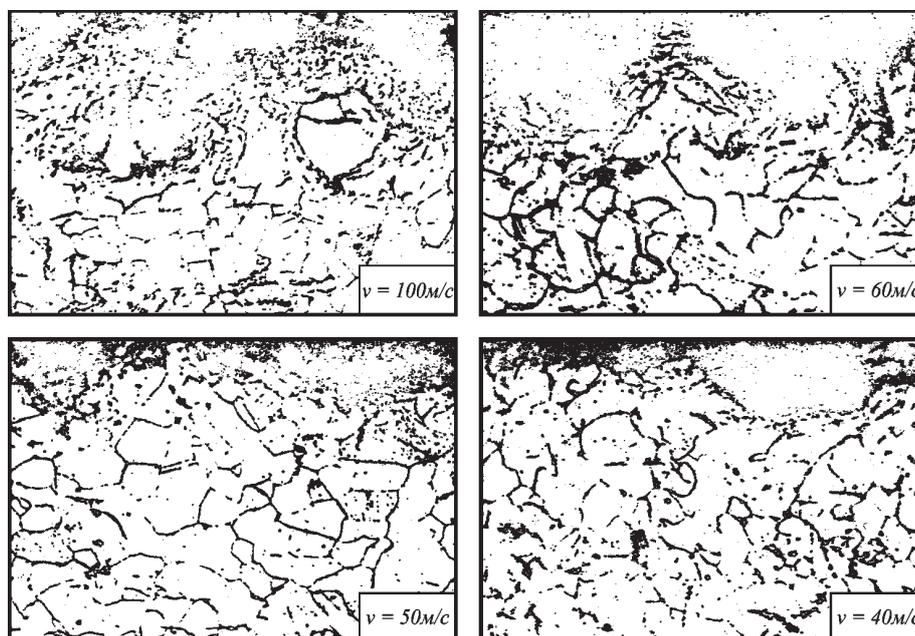


Рис. 3. Микроструктура поверхностного слоя ( $\times 200$ ) стали 08сп после дробеструйной обработки под углом  $\alpha = 60^\circ$

Об увеличении глубины наклепанного поверхностного слоя стали 08сп при этих же условиях обработки дробеструйным факелом можно судить также из табл.2.

Таблица 2

Микротвердость феррита  $H_{50}$  ( $H/mm^2$ ) при различных скоростях атаки

Угол атаки $\alpha$ , град.	Глубина наклепанного слоя, мкм	Скорость атаки $v$ , м/с				
		100	80	60	50	40
30	20	2710	2650	2360	2210	2200
	40	2480	–	2210	2180	2180
	60	2180	–	2090	2010	2090
	80	2020	2005	2010	1930	1860
	100	1790	–	1860	1860	1790
	120	1720	–	1790	1660	1600
	140	1700	–	1720	1550	1500
	160	1600	1600	1600	–	–
60	20	2710	2630	2600	2510	2480
	40	2270	–	2180	2180	2090
	60	2180	–	1860	2180	2010
	80	2090	–	1790	2090	1930
	100	2090	–	1860	1860	1730
	120	1860	–	1760	1660	1660
	140	1730	–	1660	1550	1500
	160	1600	1600	1600	1550	1500

По истечении 10с воздействия струи абразивных частиц (дробь), выбрасываемых дробеструйным соплом в количестве  $V_c = 20 \text{ кг/мин}$  под углом атаки  $\alpha = 30^\circ$  со скоростью атаки  $v = 100 \text{ м/с}$ , дальнейшее время обработки заметного влияния на микрорельеф поверхности, микротвердость, глубину наклепанного слоя и шаржирование поверхности осколками дроби не оказывает. Шероховатость поверхности, достигнутая после 10с обработки, практически сохраняется при дальнейшей обработке. Производительность процесса при этом стабилизируется. Количество внедренных осколков дроби на  $1 \text{ м}^2$  поверхности составляет 0,6...0,8шт.

Глубина наклепанного слоя с увеличением времени воздействия струи дроби  $t$  от 10с до 40с практически не изменяется и составляет 100...120мкм (табл. 3).

Электронномикроскопические исследования поверхности дробеструенных образцов свидетельствует о том, что на характер разрушения поверхностного слоя основное влияние оказывает угол атаки  $\alpha$  и скорость атаки  $v$ . При малых углах атаки  $\alpha \leq 30^\circ$  наблюдается пластическое деформирование поверхностного слоя, пропахивания дробинками бороздок в металле, оттеснение металла, что характерно для микрорезания. Большинство дробинок при этом изменяет свою траекторию и вращается вокруг собственной оси.

Большие углы атаки  $\alpha = 75...90^\circ$  способствуют значительным пластическим деформациям поверхностного слоя, смещению отдельных кристаллических блоков металла по нормали к обрабатываемой поверхности и возникновению, по-видимому, высоких локальных температур, так как на микрофотографиях обрабатываемой поверхности отчетливо видны оплавленные участки в месте контакта дробинки с обрабатываемой поверхностью. Отделение частичек металла происходит вследствие многократного пластического деформирования микроучастков поверхности металла. При этом наблюдается значительное шаржирование поверхности осколками дроби по сравнению с дробеструйной обработкой при малых углах атаки  $\alpha \leq 30^\circ$ .

Электронномикроскопические фотографии (здесь не приводятся) поверхности образцов свидетельствуют о следующем. При угле атаки  $\alpha = 30^\circ$  и скорости атаки  $v = 100 \text{ м/с}$  четко видны следы пропахивания режущими кромками дробинки обрабатываемой поверхности, что характерно для микрорезания. При угле атаки  $\alpha = 45^\circ$  и скорости атаки  $v = 100 \text{ м/с}$  следы пропахивания бороздок на обрабатываемой поверхности несколько ослабевают, но все-таки имеют выраженное направление с микроучастками схватывания режущих кромок дробинки с обрабатываемой металлической поверхностью.

Таблица 3

Микротвердость феррита  $H_{50}$  ( $H/mm^2$ ) поверхностного слоя стали 08сп  
при различной времени обработки поверхности под углом  $\alpha = 30^\circ$  со скоростью  $v = 100 м/с$

Глубина слоя, <i>мкм</i>	наклепанного	Время обработки <i>t</i> , с			
		10	20	30	40
20		2210	2480	2480	2480
40		2360	2270	2180	2210
60		2480	2490	2010	2090
80		1790	2180	2010	1930
100		1660	2010	2010	1790
120		1600	1790	1860	1860
140		–	1600	1600	1600
160		–	–	–	1600

С увеличением угла атаки  $\alpha$  до  $60^\circ$  при той же скорости атаки  $v = 100 м/с$  следы дробинок на обрабатываемой поверхности завершаются валиками оттесняемых микрообъемов металла, которых при аналогичном воздействии последующих дробинок приводят к усталостному механизму разрушения поверхностного слоя. Атака поверхности при угле  $\alpha = 90^\circ$  и скорости  $v = 100 м/с$  дает хаотически разрушенные лунки от воздействия дробинок. Это свидетельствует о внедрении выступов дробинок в пластически деформируемый поверхностный слой при одновременном перекачивании и проворачивании дробинок, в результате которых дробинки рикошетируют при различных углах, а режущие кромки дробинок отламываются и остаются в поверхностном слое.

Увеличение скорости атаки от  $40$  до  $100 м/с$  при углах атаки соответственно  $30^\circ$  и  $45^\circ$  заметно влияет на микрорельеф обрабатываемой поверхности. Следы и бороздки от воздействия дробинок становятся более четкими и выраженными с увеличением скорости атаки, что говорит о заметном повышении температуры в зоне контакта вследствие увеличения скорости пропахивания.

Прямой угол атаки  $\alpha = 90^\circ$  приводит к внедрению микровыступов дробинок в обрабатываемую поверхность. Они отламываются при хаотическом рикошете дробинок и остаются в поверхностном слое, таким образом, шаржируя обрабатываемую поверхность осколками дробинок. Лунки от воздействия абразивных частичек имеют близкую к сегменту форму.

При средних углах атаки  $\alpha = 45...75^\circ$ , наряду с микрорезанием, поверхность подвергается существенному пластическому деформированию. Это способствует образованию хорошо развитого микрорельефа обработанной поверхности, что положительно отражается на прочности сцепления защитного покрытия с подложкой, и большему внедрению осколков дроби, что отрицательно влияет на сплошность защитного покрытия. С увеличением скорости атаки  $v$  на всех углах атаки  $\alpha$  процессы микрорезания и усталостного разрушения поверхностного слоя усиливаются.

Проведенные металлографические и электронномикроскопические исследования свидетельствуют о том, что технологические режимы дробеструйной обработки с целью очистки поверхности стальных деталей, подвергнутых термической обработке в режиме нормализационного отжига, оказывают существенное влияние на качество обработанной поверхности (шероховатость, структуру, твердость, глубину наклепанного слоя, шаржирование поверхностного слоя осколками дроби).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аппен А.А. Температуроустойчивые неорганические покрытия / А.А. Аппен. – Л: Химия, 1976. – 296с.
2. Металлографическое определение включений в стали / Червяков А.Н. и др. – М: Металлургиздат, 1962. – 243с.
3. Горик А.В. Шаржирование обрабатываемой поверхности при дробеструйной обработке /А.В. Горик, А.А. Ландарь, А.Н. Чернявский, Г.А. Шулянский // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Одеса: зовнішнрекламсервіс 2012. – В. №47. – Частина 1. – С. 71-77.
4. Горик А.В. Механизм разрушения поверхностного слоя металлических изделий при дробеструйной очистке / А.В. Горик, А.Н. Чернявский, А.А. Ландарь, Г.А. Шулянский // Сб. докладов 6-й междунаро. науч. конф. «Механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов» – Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2012. – С. 17-22.