

ТЕХНОЛОГИЯ СТРУЙНОЙ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ ОЧИСТКИ ОТ КОРРОЗИИ СТАЛЬНЫХ ЛИСТОВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ПОД ЛАЗЕРНУЮ РЕЗКУ

Докт. техн. наук, проф. КАЧАНОВ И. В., инж. ФИЛИПЧИК А. В., канд. техн. наук ШЕЙКО А. М.,
студенты РУБЧЕНЯ А. А., УШЕВ С. И.

Белорусский национальный технический университет

Отличительной особенностью современного промышленного производства Республики Беларусь являются отсутствие собственной сырьевой базы и существенная зависимость от импортных энергоносителей и материальных ресурсов, поставляемых по мировым ценам. При работе в таких условиях эффективность производства в основном может быть достигнута за счет всемерной экономии и использования энерго- и ресурсосберегающих технологий, обеспечивающих получение высококачественной, конкурентоспособной продукции. Примером такой технологии может служить лазерная резка (ЛР). Технология ЛР, обычно применяемая на промышленных производственных линиях, основана на том, что сфокусированный лазерный луч обеспечивает высокую концентрацию энергии и позволяет разрезать практически любые материалы независимо от их теплофизических свойств. Лазерная резка отличается отсутствием механического воздействия на обрабатываемый материал, при этом возникают минимальные деформации, как временные в процессе резки, так и остаточные после полного остывания. Вследствие этого ЛР даже легкодеформируемых и нежестких заготовок и деталей можно осуществлять с высокой степенью точности. Благодаря большой мощности лазерного излучения обеспечивается высокая производительность процесса в сочетании с высоким качеством поверхностей реза. Легкое и сравнительно простое управление лазерным излучением позволяет осуществлять ЛР по сложному контуру плоских и объемных деталей и заготовок с высокой степенью автоматизации процесса.

Эффективное использование ЛР при разделке стальных листов может быть достигнуто при соответствующей подготовке стальной по-

верхности. В частности, при использовании лазерного комплекса TRUMATIC L2530 поверхность стального листа должна после предварительной обработки иметь шероховатость $Ra = 0,4-1,0$ мкм и обладать при этом минимальным (по отношению к условиям поставки) уровнем упрочнения. При использовании в качестве характеристики упрочнения такого параметра, как микротвердость H_μ , необходимо, чтобы ее величина по отношению к исходному значению $H_{\mu 0}$ ($H_{\mu 0}$ – микротвердость поверхности листового металла применительно к условиям поставки) не выходила за пределы соотношения $H_\mu = (1,1-1,4)H_{\mu 0}$.

Основная часть. Для исследования процесса гидроабразивной очистки (ГАО) в НИИЛ «Водохозяйственные системы» (ВХС) был разработан стенд, представленный на рис. 1. Он включает в себя бак 1 объемом 200 л, три мембранных насоса 3 марки 7000 НА с номинальной мощностью 2,2 кВт и максимальным рабочим давлением до 40 МПа [1]. Параллельное соединение насосов дает возможность изменять подачу в диапазоне от 5,6 до 16,8 л/мин и получать давление на входе в сопло от 10 до 40 МПа. Стенд также содержит напорные линии 4 с регулируемыми дросселями 5, тройник 6 со штуцерным соединением, манометр 7 для измерения давления на входе в конфузор 8. Для того чтобы изменять расход жидкости и режимы обработки, используются конфузоры с диаметром выходного сечения $d_k = 1 \cdot 10^{-3}$ м. С целью обеспечения детального исследования обработки металлическая пластина 9 может приводиться во вращение при помощи электродвигателя 11. Мерный бак 10 используется для измерения расхода объемным способом, а регулировочное устройство 13 – для изменения расстояния L от обрабатываемой пластины до конфузора.

При включении насосов высокого давления из бака через фильтрующие элементы рабочая жидкость по напорным линиям подается к конфузору (рис. 1). Давление на входе в конфузор регистрируется манометром, при этом для гашения пульсаций в потоке рабочей жидкости установлены регулирующие дроссели. Из конфузора струя подается на очищаемую металлическую пластину, которая приводится во вращение электродвигателем. Расстояние L от конфузора до обрабатываемой пластины регулируется устройством. Очистка поверхностей происходит в баке, в котором установлены мерная шкала 14, сливной кран 15 и крышка 12.

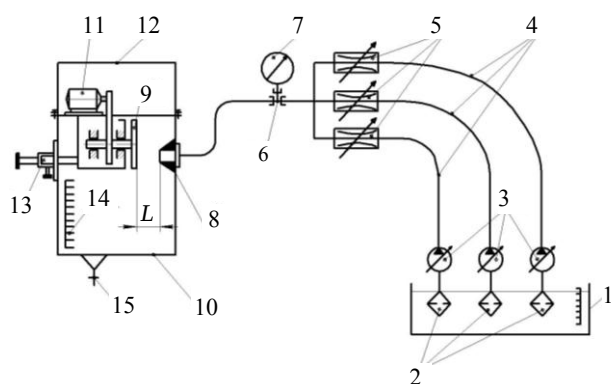


Рис. 1. Схема экспериментального стенда

Одним из основных элементов в рассмотренной схеме экспериментального стенда является конфузор. Эффективность его работы оценивали по массовому съему металла в единицу времени. Эксперименты выполняли на плоских образцах из стали 08кп с размерами $4 \times 50 \times 50$ мм. Массовый съем металла определяли взвешиванием до и после ГАО на аналитических весах ВЛЛ-200М с точностью до 10^{-4} г.

Результаты по изучению влияния угла конусности конфузора α на массовый съем материала Δm приведены на рис. 2. Из графиков видно, что в исследованном диапазоне входных давлений $p_{вх} = (17-30)$ МПа с увеличением угла α от 0 до 50° массовый съем возрастает и достигает максимального значения при $\alpha = 50^\circ$. При дальнейшем возрастании угла α отмечается снижение зависимости $\Delta m = f(\alpha)$, что можно объяснить динамическими (скоростными) характеристиками струи, которые достигают своего максимального значения при $\alpha = 40^\circ-50^\circ$. Полученные результаты полностью

совпадают с данными теоретического анализа, в соответствии с которыми минимальные потери напора и, следовательно, максимальные скорости струи на выходе из конфузора имеют место при оптимальных углах конусности $\alpha_{опт} = 40^\circ-50^\circ$ [2, 3].

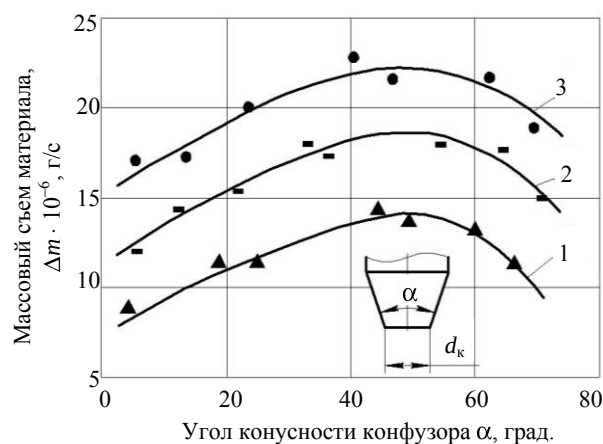


Рис. 2. Зависимость массового съема материала Δm от угла конусности конфузора α : $K_b = 3\%$; $K_n = 10^{-5}\%$; $K_{к.с} = 2\%$; остальное – вода; $d_k = 1 \cdot 10^{-3}$ м; $L = 50$ мм; 1 – $p_{вх} = 17$ МПа; 2 – 22; 3 – 30 МПа

Следует отметить, что в этих и последующих экспериментах для обработки использовали рабочую жидкость, содержащую бентонитовую глину ($K_b = 3\%$), полиакриламид ($K_n = 10^{-5}\%$), кальцинированную соду ($K_{к.с} = 2\%$), остальное – вода. Указанный состав характеризуется патентной новизной как в части компонентов, так и их концентрации в составе рабочей жидкости [4].

Как уже отмечалось ранее, шероховатость и микротвердость относятся к важным параметрам поверхности, которые необходимо обеспечивать для качественного проведения такой выхотехнологичной операции, как ЛР. Для проведения исследований использовали образцы из сталей 08кп, рекомендованные техбюро завода ОАО «Агат – электромеханический завод» для очистки от продуктов коррозии. Шероховатость поверхности образца измеряли в соответствии с ГОСТ 2789–73 на профилометре-профилографе модели 252 типа А1. Погрешность измерений на профилометре составляла около 5 %.

Влияние расстояния L от конфузора до обрабатываемой поверхности на шероховатость поверхности Ra при изменении давления на входе в конфузор $p_{вх}$ от 17 до 30 МПа с исполь-

зованием состава рабочей жидкости согласно [4] представлено на рис. 3. При этом исходная шероховатость поверхности составляла 14 мкм.

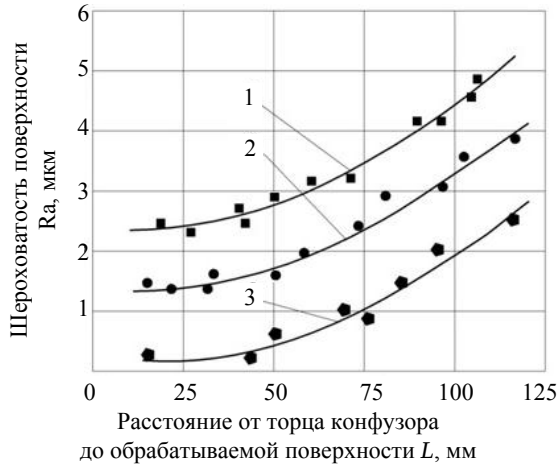


Рис. 3. Зависимость шероховатости R_a от расстояния L : $K_6 = 3\%$; $K_{II} = 10^{-5}\%$; $K_{к.с} = 2\%$; остальное – вода; $d_k = 1 \cdot 10^{-3}$ м; 1 – $p_{вх} = 17$ МПа; 2 – 22; 3 – 30 МПа

Как следует из рис. 3, шероховатость обработанной поверхности R_a увеличивается от 0,2 до 5,5 мкм при изменении L от 20 до 110 мм. На рис. 3 видно, что при давлении на входе в конфузор $p_{вх} = 30$ МПа и расстоянии L от 15 до 50 мм значения шероховатости R_a составляют (0,2–0,4) мкм, что является оптимальным диапазоном для поверхности, предназначенной под ЛР [5].

Для определения скорости струи $v_{стр}$ использовали известное выражение

$$v_{стр} = \frac{4Q}{\pi d_k^2},$$

где Q – расход (определяли опытным путем с погрешностью 2–3 %) рабочей жидкости в конфузоре, м³/с; d_k – диаметр конфузора в его выходном сечении (рис. 2), м.

Зависимость шероховатости поверхности R_a от скорости струи $v_{стр}$ приведена на рис. 4. Из анализа кривых рис. 4 следует, что шероховатость обработанной поверхности R_a уменьшается от 5,5 до 0,2 мкм при увеличении $v_{стр}$ от 30 до 250 м/с. Уменьшение R_a объясняется тем, что с возрастанием скорости струи рабочей жидкости происходит повышение силового воздействия рабочей жидкости на обрабатываемую по-

верхность. При увеличении скорости струи от 150 до 250 м/с шероховатость при $L = 50$ мм изменяется в диапазоне $R_a = 0,2$ –0,4 мкм, что отвечает требованиям, которые предъявляются к поверхности, подготовленной под ЛР.

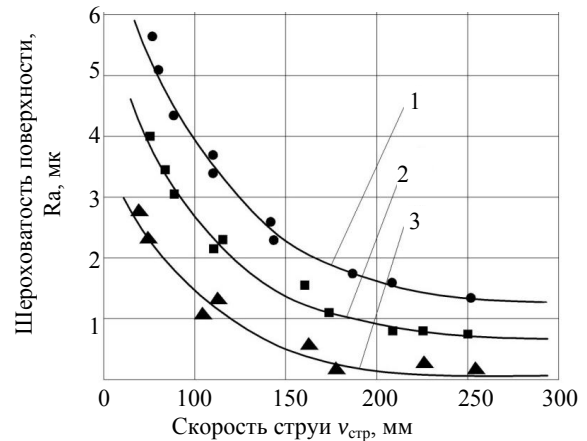


Рис. 4. Зависимость шероховатости поверхности R_a от скорости струи $v_{стр}$: $K_6 = 3\%$; $K_{II} = 10^{-5}\%$; $K_{к.с} = 2\%$; остальное – вода; $d_k = 1 \cdot 10^{-3}$ м; 1 – $L = 150$ мм; 2 – 100; 3 – 50 мм

Наряду с шероховатостью при проведении исследований изучали влияние струйной обработки поверхности на микротвердость H_{μ} . Измерение микротвердости проводили на микротвердомере Micromet-2 с нагрузкой на индентор, равной 0,5 Н (ГОСТ 9450–76).

Зависимость влияния расстояния L от конфузора до обрабатываемой поверхности на микротвердость поверхности H_{μ} при изменении давления на входе в конфузор представлена на рис. 5. Как следует из рис. 5, в диапазоне $L = 20$ –50 мм при всех исследованных входных давлениях $p_{вх} = (17; 22; 30)$ МПа отмечается плавное снижение значения H_{μ} . При этом максимальная величина H_{μ} , равная 2350 МПа, отмечается при $p_{вх} = 30$ МПа и не превышает допустимой величины отношения $H_{\mu}/H_{\mu 0}$ ($H_{\mu}/H_{\mu 0} = 2350 : 1900 = 1,23$), отвечающего требованиям ЛР.

Из данных на рис. 6, где приведена зависимость H_{μ} от скорости струи $v_{стр}$, видно, что в диапазоне скоростей $v_{стр} = 150$ –250 м/с и для расстояния $L = 20; 50$ мм, характерно увеличение микротвердости практически по параболической зависимости. Значения H_{μ} в этом диапазоне скоростей возрастают на 7–12 %, изменяясь от 2050–2080 до 2200–2300 МПа. Для этих же

условий обработки величина отношения $H_{\mu}/H_{\mu 0}$ не выходит за пределы допустимых значений, достигаемых при скорости 280 м/с диапазона 1,25–1,20 (большее значение относится к обработке при $L = 20$ мм, а меньшее соответствует режиму ГАО при $L = 50$ мм), что в полной мере отвечает требованиям, предъявляемым к обрабатываемой поверхности в части ее упрочнения перед ЛР.

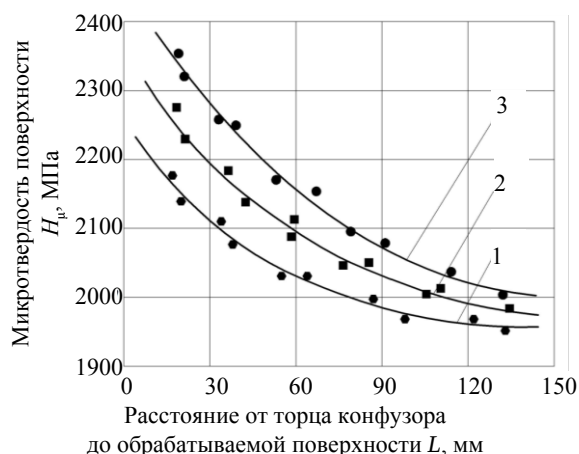


Рис. 5. Зависимость микротвердости поверхности H_{μ} от расстояния L между конфуззором и обрабатываемой поверхностью: $K_6 = 3\%$; $K_{\Pi} = 10^{-5}\%$; $K_{\text{к.с}} = 2\%$; остальное – вода; $d_k = 1 \cdot 10^{-3}$ м; 1 – $p_{\text{вх}} = 17$ МПа; 2 – 22; 3 – 30 МПа

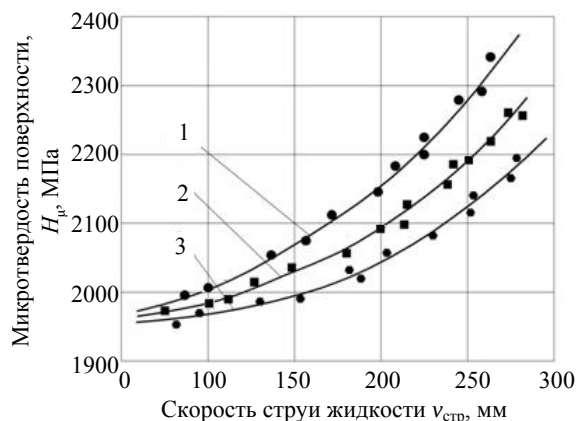


Рис. 6. Зависимость микротвердости поверхности H_{μ} от скорости струи $v_{\text{стр}}$: $K_6 = 3\%$; $K_{\Pi} = 10^{-5}\%$; $K_{\text{к.с}} = 2\%$; остальное – вода; $d_k = 1 \cdot 10^{-3}$ м; 1 – $L = 20$ мм; 2 – 50; 3 – 150 мм

Зависимость изменения микротвердости поверхности H_{μ} при различных концентрациях бентонита K_6 в составе рабочей жидкости представлена на рис. 7. Как следует из рис. 7, микротвердость обработанной поверхности дости-

гает максимальных величин при значениях концентрации бентонита в составе рабочей жидкости $K_6 = 2\text{--}3\%$. При этом превышение максимальной величины H_{μ} ($H_{\mu} = 2330$ МПа) по отношению к исходной микротвердости $H_{\mu 0} = 1850$ МПа составляет 25,9 %, что в полной мере отвечает требованиям ЛР на комплексе TRUMATIC L2530.

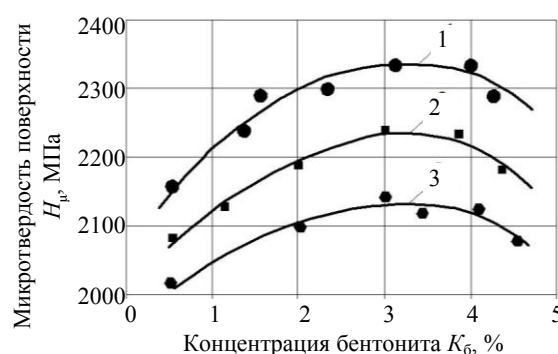


Рис. 7. Зависимость микротвердости поверхности H_{μ} от концентрации бентонита K_6 в рабочей жидкости: $K_{\Pi} = 10^{-5}\%$; $K_{\text{к.с}} = 2\%$; остальное – вода; $d_k = 1 \cdot 10^{-3}$ м; $p_{\text{вх}} = 30$ МПа; 1 – $L = 20$ мм; 2 – 50; 3 – 150 мм

Как видно из графиков, представленных на рис. 5–7, величина микротвердости H_{μ} зависит от изменения режимных параметров обработки: скорости струи $v_{\text{стр}}$, давления на входе в конфуззор $p_{\text{вх}}$, расстояния L до обрабатываемой поверхности, концентрации бентонита K_6 в составе рабочей жидкости. При этом требуемое по условиям ЛР соответствие между H_{μ} и $H_{\mu 0}$ ($H_{\mu} = (1,2\text{--}1,4)H_{\mu 0}$) имеет место при $L = 20\text{--}50$ мм; $v_{\text{стр}} = 150\text{--}250$ м/с; $K_6 = 2\text{--}3\%$; $p_{\text{вх}} = 25\text{--}30$ МПа.

При струйной обработке образцов рабочей жидкостью, содержащей бентонитовую глину, кальцинированную соду, полиакриламид, был установлен факт формирования на поверхности пленочного покрытия (рис. 8а, б). Исследование морфологии и химического состава пленочного покрытия на обработанных поверхностях проводили в НИИ порошковой металлургии (г. Минск).

Для исследования этого вопроса были взяты образцы размером 100×100 мм из стали 08кп, обработанные струей рабочей жидкости ($K_6 = 3\%$; $K_{\Pi} = 10^{-5}\%$; $K_{\text{к.с}} = 2\%$; остальное – вода), при $L = 50$ мм; $v_{\text{стр}} = 185$ м/с; $d_k = 1$ мм. Время сушки образцов при комнатной температуре ($T = 20$ °С) после обработки составляло 20–24 ч.

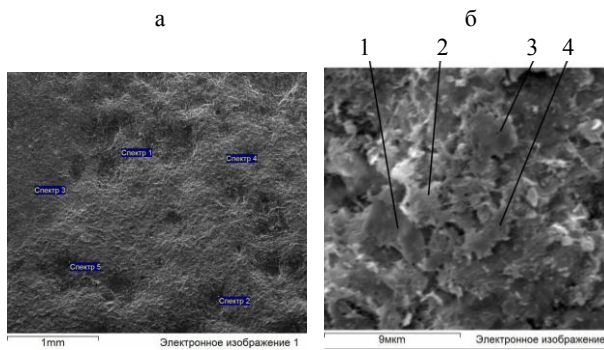


Рис. 8. Внешний вид покрытия, сформированного на поверхности образцов после ГАО: 1–4 – чешуйки; а – $\times 40$; б – $\times 5000$

На рис. 8а, б представлены участки пленочных покрытий, сформированных на поверхности стальных образцов и исследованных на морфологию и химсостав. На обработанной поверхности образуется покрытие, состоящее из пластин (чешуек) (позиции 1–4), взаимосвязанных друг с другом и с обработанной поверхностью.

Для установления химических элементов, входящих в состав покрытия был произведен химический анализ в спектрах 1–5 (рис. 8а) без учета Fe (табл. 1) и с учетом Fe (табл. 2).

Таблица 1

Химический состав покрытия, сформированного на поверхности образца (сталь 08кп) после ГАО составом рабочей жидкости [4] без учета содержания Fe

Спектр	C	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	O
1	17,44	0	1,80	3,11	11,57	0,86	1,03	64,19
2	20,04	0,60	1,20	2,11	7,92	0,62	1,50	66,01
3	18,82	0,70	1,30	2,63	9,06	0,72	1,95	64,82
4	15,48	0,62	1,87	3,98	13,60	1,01	1,08	62,36
5	17,02	0	1,69	2,60	11,78	1,17	2,37	63,37
Среднее	17,76	0,38	1,57	2,88	10,79	0,88	1,59	64,15

Таблица 2

Химический состав покрытия, сформированного на поверхности образца (сталь 08кп) после ГАО составом рабочей жидкости [4] с учетом содержания Fe

Спектр	C	Na	Mg	O	Al	Si	K	Ca	Fe
1	10,67	0,10	1,48	13,87	2,29	7,55	0,41	0,48	63,25
2	11,48	0,60	0,86	10,62	1,32	4,40	0,25	0,57	70,51
3	8,57	0,30	0,81	9,37	1,40	4,24	0,24	0,61	74,77
4	7,54	0,52	1,39	16,56	2,57	7,70	0,42	0,43	63,40
5	4,62	0,40	0,69	7,13	0,91	3,54	0,23	0,45	82,44
Среднее	8,57	0,38	1,05	11,51	1,70	5,49	0,31	0,51	70,88

Из анализа данных табл. 1, 2 видно, что в состав пленочного покрытия входят элементы, ко-

торые составляют химическую основу компонентов рабочей жидкости (бентонитовая глина, кальцинированная сода, полиакриламид). Исследованиями было установлено, что средняя толщина сформированного покрытия составляет 5–8 мкм, а его адгезионная прочность с обработанной поверхностью – 20–30 МПа.

Оценку влияния качества сформированной поверхности на эффективность процесса ЛР проводили на комплексе TRUMATIC L2530. Для процесса ЛР металлов на этом комплексе основным эксплуатационным параметром является максимальная скорость лазерной резки $v_{лр}$, определяющая производительность и качественные показатели процесса исходя из условия отсутствия грата на вырезанных деталях [5–7].

Для проведения испытаний в ОАО «Агат – электромеханический завод» были выбраны образцы из стали 08кп с линейными размерами 100×100 мм и толщиной от 1 до 20 мм, покрытые продуктами коррозии. При этом:

- 1-й образец очищали по технологии ГАО от коррозии до шероховатости поверхности $Ra = 0,25–0,50$ мкм и $H_{\mu} = 2330$ МПа составом, предложенным в [4], с давлением на входе в конфузор $p_{вх} = 30$ МПа; $d_k = 1$ мм; $L = 50$ мм; $v_{стр} = 250$ м/с; после очистки время сушки образца с целью формирования на его поверхности бетонитовой защитной пленки составило 20 ч;

- 2-й образец вырезали из листового металла (в состоянии поставки со следами коррозии), с исходной микротвердостью $H_{\mu 0} = 1850–1900$ МПа;

- 3-й образец прошел очистку от коррозии по заводской технологии (дробеструйная обработка) до шероховатости поверхности $Ra = 0,4–2,0$ мкм.

Указанные образцы подвергали лазерной резке на комплексе TRUMATIC L2530 (рис. 9). По результатам проведенных испытаний было установлено, что для образцов толщиной $S = 2$ мм отмечалось увеличение максимальной скорости ЛР с 0,4 м/мин (резка образца № 2) до 4,8 м/мин (резка образца № 1). При равной скорости резки (4,8 м/мин) на 1-м образце грат отсутствовал, из чего следует, что технологическая операция по зачистке грата нецелесообразна, а, например, на 2-м образце, длина грата составляла 2 мм.

При сопоставлении 1-го и 3-го образцов по такому параметру, как скорость ЛР, видно, что применение ГАО обеспечивает повышение скорости ЛР в среднем на 10–20 %. Отмеченное

увеличение скорости ЛР на 1-м образце можно объяснить малой величиной упрочнения поверхностного слоя, достигающей значений $H_{\mu} = 2200\text{--}2250$ МПа при давлении $p_{\text{вх}} = 30$ МПа и расстоянии $L = 50$ мм (рис. 5). Кроме этого, повышению скорости ЛР способствует наличие на поверхности требуемой шероховатости $Ra = 0,2\text{--}0,4$ мкм, покрытой защитной светопоглотительной бентонитовой пленкой, исключающей отражение лазерного луча от поверхности разрезаемого материала.

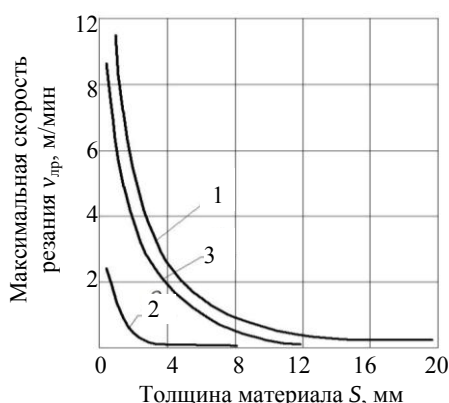


Рис. 9. Зависимость максимальной скорости резания от толщины материала: 1, 2, 3 – номера испытуемых образцов

Для оценки эффективности процесса ГАО совместно с ОАО «Агат – электромеханический завод» на основании производственных испытаний был выполнен расчет экономической эффективности изготовления детали ЦИКС.745422.057 – кронштейн. Экономический эффект от использования результатов исследований составил 222772,7 руб. за одну смену лазерной резки серии деталей ЦИКС.745422.057 – кронштейн в ОАО «Агат – электромеханический завод» в ценах на 15 июля 2011 г.

ВЫВОДЫ

1. В ходе проведенных исследований экспериментально подтверждена оптимальная величина угла конусности конфузора для обработки поверхностей под лазерную резку при помощи гидроабразивной очистки, позволяющая минимизировать потери на трение, которая составила $40^{\circ}\text{--}50^{\circ}$.

2. Определены важные параметры процесса гидроабразивной очистки ($L = 20\text{--}50$ мм, $v_{\text{стр}} = 150\text{--}250$ м/с; $K_{\text{с}} = 2\text{--}3$ %; $p_{\text{вх}} = 25\text{--}30$ МПа),

позволяющие получить необходимые шероховатость, микротвердость поверхности под лазерную резку ($Ra = 0,2\text{--}0,5$ мкм и $H_{\mu} = (1,2\text{--}1,4)H_{\mu 0}$) и пленочное покрытие, исключающее отражение лазерного луча от обработанной поверхности.

3. Проведенные производственные испытания показали перспективность использования способа гидроабразивной очистки для очистки поверхности стальных листов от продуктов коррозии и последующего их использования под лазерную резку, в результате чего скорость лазерной резки увеличивается на 10–20 %. Применение гидроабразивной очистки в условиях ОАО «Агат – электромеханический завод» обеспечивает годовой экономический эффект (при внедрении на лазерном комплексе TRUMATIC L2530 (ФРГ)) около 53,5 млн руб.

ЛИТЕРАТУРА

1. Экспериментальный стенд для струйной обработки металлических поверхностей / И. В. Качанов [и др.] // Агропанорама. – 2005. – № 1. – С. 22–23.
2. Устройство для формирования многокомпонентной кавитирующей струи жидкости: пат. 7969 Респ. Беларусь, МКИ В 08В 3/02, МКИ В 08В 3/04, В 63В 59/08 / И. В. Качанов, В. В. Веремениук, А. В. Филипчик, С. И. Ушев, А. А. Рубчя; заявитель Белорус. нац. техн. ун-т. – № u 20110544; заявл. 04.07.2011; опубл. 28.02.2012 // Официальн. бюл. // Нац. центр интеллектуал. собственности. – 2011. – № 1. – С. 214.
3. Качанов, И. В. Теоретические и экспериментальные исследования по определению струйного давления рабочей жидкости на обрабатываемую плоскую поверхность / И. В. Качанов, А. В. Филипчик // Наука и техника. – 2012. – № 1. – С. 79–85.
4. Способ создания кавитирующей струи жидкости: пат. 13312 Респ. Беларусь, МКИ В 08В 3/04, В 63В 59/00 / И. В. Качанов, В. Н. Яглов, В. К. Недбальский, А. В. Филипчик; заявитель Белорус. нац. техн. ун-т. – № a 20081284; заявл. 14.10.2008; опубл. 30. 06. 2010 // Официальн. бюл. // Нац. центр интеллектуал. собственности. – 2010.
5. Памфилов, Е. А. Формирование качества поверхностей при лазерной обработке / Е. А. Памфилов, В. Д. Северин // Вестник машиностроения. – 1982. – № 4. – С. 46–48.
6. Паспорт 12. Bimberg, D. und vier Mitautoren: Materialbearbeitung mit Lasern (Kontakt & Studium, Band 343), Expert Verlag, Ehningen bei Boblingen, 1991. – 384 p.
7. Качанов, И. В. Применение струйной обработки под давлением более 15 МПа для подготовки стальных поверхностей под лазерную резку / И. В. Качанов, А. В. Филипчик // Современные проблемы гидропневмосистем машин: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 60-летию создания автотракторного факультета БНТУ, Минск, 24–28 октября 2011 г. – Минск, 2011. – С. 28–34.

Поступила 17.01.2013