

Упругопластическое деформирование поверхностного слоя машиностроительных конструкций при дробеструйной обработке

А. В. Горик^а, А. П. Зиньковский^б, Р. Е. Черняк^в, А. Н. Брикун^а

^а Полтавская государственная аграрная академия, Полтава, Украина

^б Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

^в Кременчугский автомобильный завод, Кременчуг, Украина

Приведены результаты экспериментальных исследований по оценке влияния режимов дробеструйной обработки металлических поверхностей для нанесения защитного неметаллического покрытия. Описана методика определения характера упругопластического деформирования поверхностного слоя с использованием экспериментально-аналитического коэффициента, который учитывает упругопластические свойства материала обрабатываемой поверхности. Представлены результаты сравнения экспериментальных данных с теоретическими. Изложены предпосылки возможного механизма разрушения поверхностного слоя металлических изделий при дробеструйном воздействии.

Ключевые слова: дробеструйная обработка, деформирование поверхностного слоя, механизм разрушения, упругопластическая модель, контактные напряжения.

Введение и постановка задачи. Прочность машиностроительных конструкций в значительной мере зависит от состояния их поверхностного слоя. Среди них отметим узлы, имеющие полости, для которых в соответствии с технологическим процессом характерны наличие агрессивной рабочей среды и действие повышенных температуры и давления. Изготовление таких изделий из дорогостоящих конструкционных материалов, обладающих достаточной прочностью и высокой антикоррозионной устойчивостью, экономически неоправданно. Поэтому при проектировании рассматриваемых технических изделий используют углеродистые стали и сплавы, а для защиты поверхностей применяют неметаллические покрытия (стекловидные, стеклокристаллические, полимерные, керамические и пр.), которые могут противодействовать химически активной среде.

Известно, что качество защитного неметаллического покрытия примерно на 80% определяется степенью подготовки металлической поверхности изделия и только 20% зависит от его химического состава [1]. Поэтому подготовке поверхности, на которую оно наносится, уделяется особое внимание.

Среди известных способов подготовки поверхности наиболее эффективной является дробеструйная обработка, или очистка поверхности благодаря ее экономичности и безвредности для окружающей среды. Однако до настоящего времени такой вид обработки, несмотря на широкое применение в различных отраслях машиностроения, остается наименее изученным технологическим процессом с точки зрения струйного воздействия твердых частиц (абразива) на поверхность изделия. Это обусловлено, по-видимому, сложностью физических явлений, которые при этом происходят, а также низкой престижностью труда из-за отсутствия комплексной механизации и автоматизации такого технологического процесса.

Особого внимания требует изучение механизма разрушения поверхностного слоя вследствие упругопластического деформирования обрабатываемой поверхности. В настоящее время отсутствует единое мнение о том, какой механизм разрушения преобладает при абразивной обработке. Одни авторы считают, что отделение частичек металла происходит в основном в результате микрорезания [2], другие отдают

предпочтение усталостному механизму разрушения [3–7], а некоторые склонны к ударно-абразивному влиянию [8]. Существуют и другие модели. Поэтому цель работы состоит в установлении закономерностей упругопластического деформирования поверхностного слоя машиностроительных конструкций при дробеструйной обработке.

Объекты исследования и методика их испытаний. Поставленная задача решалась с использованием плоских дисковых образцов диаметром 80 мм и толщиной 4 мм, изготовленных из низкоуглеродистой стали 08сп, которая широко применяется в производстве сварных конструкций машиностроительных изделий. В качестве абразивного материала для обработки образцов использовалась дробь стальная колотая марки ДСК-17 диаметром $D = 1$ мм следующего химического состава (%): 14...20 Si; <0,5 C; 0,55 Mn; 0,0935 P; 0,014 S, остальное Fe.

Дробеструйная очистка осуществлялась в специальной защитной камере, оснащенной дробеструйным аппаратом нагнетательного типа со смесительной камерой, которая заканчивается штуцером для резиноканевого рукава с условным проходом диаметром 32 мм. В качестве инструмента применялось дробеструйное сопло из металлокерамики с цилиндрическим отверстием диаметром 10 мм.

Через сопло, расстояние от которого до обрабатываемой поверхности (длина факела) выдерживалось в пределах 300 мм, дробь с помощью сжатого воздуха под определенным углом атаки разгонялась до необходимой скорости. Для определения меры разрушения поверхностного слоя вследствие дробеструйной обработки образцов их взвешивали на аналитических весах до и после испытаний.

Перед дробеструйным воздействием образцы подвергались термической обработке в режиме нормализационного отжига, как принято в химическом машиностроении. Это обеспечивает обезжиривание образцов и снятие внутренних напряжений, а также, что очень важно для прочности сцепления защитного покрытия с основой, обезуглероживание поверхностного слоя.

Для исследования характера разрушения и пластических деформаций из обработанных образцов изготовляли шлифы, которые изучали под оптическим металлографическим микроскопом МИМ-7 при различном увеличении, а структуру поверхности образцов исследовали с помощью универсального электронного микроскопа УЭМВ-100К методом реплик.

Микротвердость поверхностных слоев после дробеструйной очистки определялась микротвердомером ПМТ-3 на поперечных срезах (шлифах) при нагрузке на индентор $F = 0,5$ Н.

Кроме того, строились профилограммы обработанной поверхности образцов, что наряду с анализом характера неровностей позволяет оценить параметры ее микрорельефа (шероховатость) и определить размеры следа, образуемого атакующей дробинкой.

Анализ поверхностного слоя образцов после обработки. Проведен комплекс экспериментальных исследований по определению влияния режимов дробеструйной обработки на поверхностный слой образцов. Испытания выполнялись при следующих технологических режимах: скорость атаки $v = 40...100$ м/с; угол атаки $\alpha = 30...60^\circ$, в некоторых случаях он составлял 90° .

Результаты металлографических исследований поверхностного слоя образцов, обработанных дробеструйным факелом при различных режимах технологического процесса, свидетельствуют о том, что параметры дробеструйной очистки непосредственно влияют на микроструктуру, микротвердость, глубину наклепанного слоя и сраживание обрабатываемой поверхности осколками дроби.

В процессе экспериментальных исследований при выбранных вариативных технологических режимах установлено, что свободные абразивные дробинки (гранулы) оказывают различное ударное воздействие на обрабатываемую поверхность, а между

объемами удаленного металла и деформированного существует пропорциональная зависимость, которая характеризует механизм упругопластического деформирования и разрушения поверхностного слоя. Пластическое течение металла происходило также в направлении, перпендикулярном траектории движения дробинки.

Удельный объем металла, который оттесняется дробинкой по краям следа на обрабатываемой поверхности (бороздки), возрастает с притушением кромок гранулы и снижением скорости резания. В отдельных случаях выдавленный металл достигал 80% объема оставленного следа.

Удаление микрообъемов металла с обрабатываемой поверхности при дробеструйной обработке, по-видимому, происходит как вследствие многократного пластического деформирования отдельных ее микронеровностей, что приводит к усталости материала, так и микрорезания. Преобладание того или иного из указанных механизмов при прочих, примерно равных, условиях в большей степени зависит от скорости и угла атаки дробинки.

Для иллюстрации качественной картины упругопластического деформирования стали в процессе дробеструйной обработки рассмотрим микрошлифы поверхностного слоя обработанных образцов, которые получены для некоторых скоростей v атаки из заданного диапазона значений ее изменения при постоянном времени ($t = 10$ с) воздействия дробеструйного факела на обрабатываемую поверхность и подачи дробы $B_c = 20$ кг/мин. В качестве примера на рис. 1 приведены микрошлифы поверхностного слоя образцов для угла атаки $\alpha = 60^\circ$.

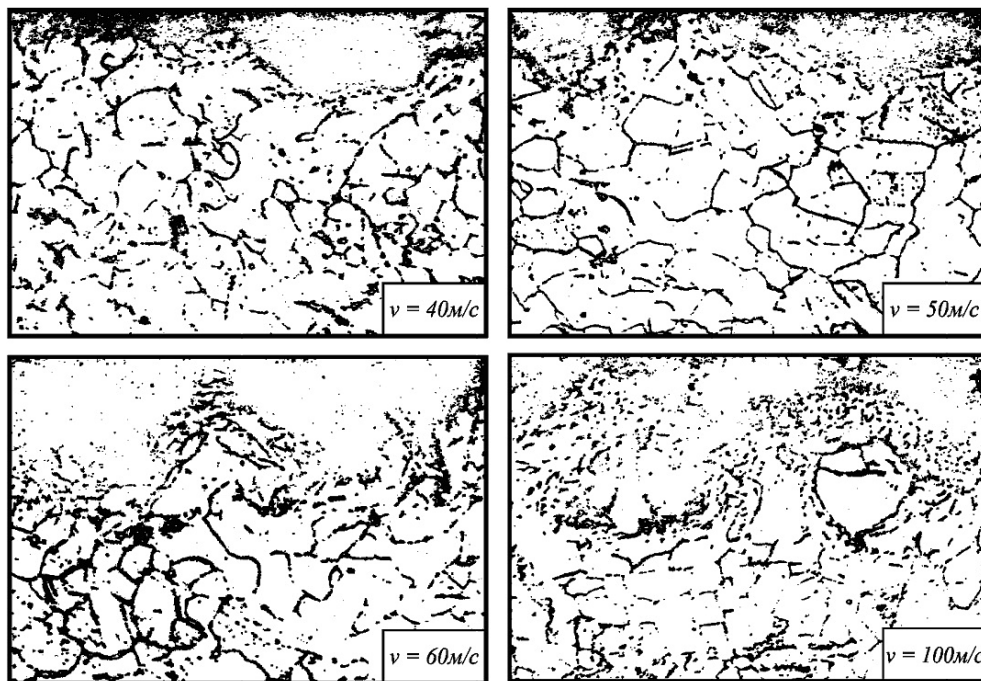


Рис. 1. Микроструктура шлифов поверхностного слоя образцов после дробеструйной обработки под углом $\alpha = 60^\circ$ для некоторых скоростей v атаки ($\times 200$).

Как показывает анализ полученных данных, повышение скорости атаки для всего диапазона изменения угла атаки усиливает процессы микрорезания и усталостного разрушения поверхностного слоя, а также приводит к более развитому микрорельефу обработанной поверхности и увеличению зоны проникновения осколков дробы в глубину металла.

По истечении заданного времени ($t = 10$ с) воздействия дробеструйного факела на обрабатываемую поверхность дальнейшего заметного его влияния на микрорельеф поверхности, микротвердость, глубину наклепанного слоя и шаржирование поверхности осколками дроби не наблюдалось. Так, шероховатость поверхности практически не изменялась при продолжении процесса до 40 с. При этом относительное количество внедренных осколков дроби в поверхность составляло $0,6...0,8$ шт/мм², а глубина наклепанного слоя колебалась в пределах $100...120$ мкм.

Электронно-микроскопические исследования структуры поверхности образцов свидетельствуют также о том, что на характер разрушения поверхностного слоя основное влияние оказывают скорость v и угол α атаки. На рис. 2 представлена микроструктура поверхности обработанных образцов при $\alpha = 60$ и 90° и $v = 60$ и 100 м/с соответственно. При $\alpha = 60^\circ$ четко видны направленные бороздки с микроучастками схватывания контактирующих материалов вследствие высоких температур и давления, а также с валиками оттесняемого металла образцов (рис. 2, а, б). Прямой угол атаки $\alpha = 90^\circ$ приводит к внедрению микрочастичек дробинки в обрабатываемую поверхность (рис. 2, в, г). Они отламываются при хаотическом рикошете дробинки и остаются в поверхностном слое, шаржируя таким образом обрабатываемую поверхность осколками атакующих дробинки. Лунки от воздействия абразивных частичек имеют близкую к сегменту форму.

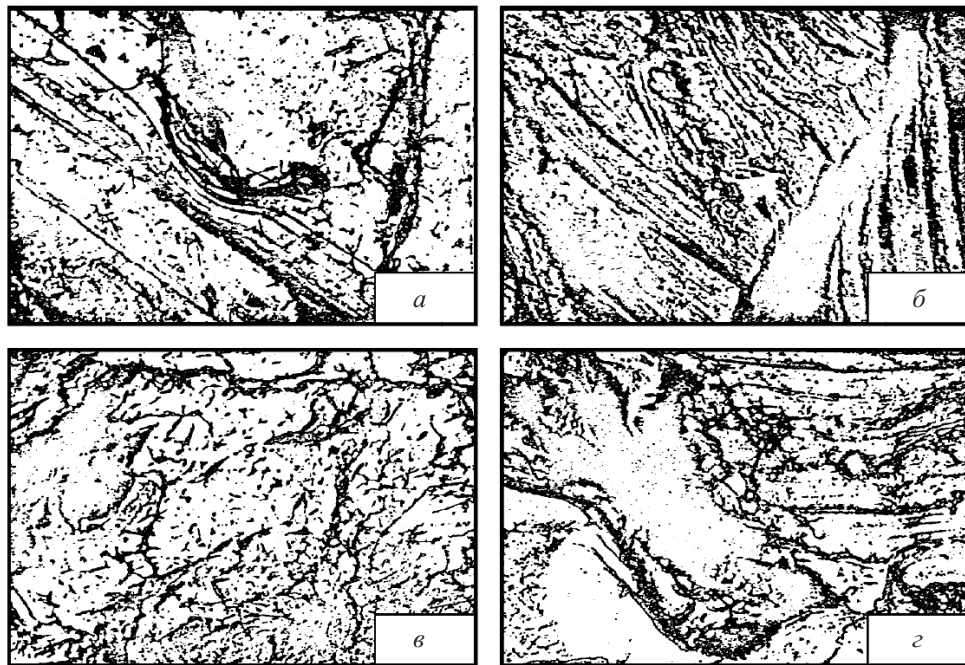


Рис. 2. Микроструктура поверхности образцов после дробеструйной обработки: а, б – $\alpha = 60^\circ$, $v = 60$ м/с; в, г – $\alpha = 90^\circ$, $v = 100$ м/с ($\times 1500$).

При малых углах атаки наблюдается пластическое деформирование поверхностного слоя с образованием на нем бороздок, а также смещение металла, что характерно для микрорезания. Большинство дробинки при этом изменяет свою траекторию и вращается вокруг собственной оси.

Обращает на себя внимание тот факт, что при $\alpha = 45...65^\circ$ наряду с микрорезанием поверхность подвергается существенному пластическому деформированию. Это способствует образованию хорошо развитого микрорельефа обработанной поверх-

ности, что положительно влияет на прочность сцепления защитного покрытия с основой.

Расчеты, проведенные на основе закона сохранения импульса (количества движения), свидетельствуют, что для исследуемых скоростей атаки и диаметра дроби величина контактных напряжений достигает порядка 1000...2000 МПа [8], что выше давления, при котором для вязких металлов наступает пластическая деформация. Такие напряжения способны разрывать связь между зернами в местах скопления дислокаций и образовывать трещины, приводящие к разрушению отдельных микрообъемов поверхностного слоя (рис. 1, 2).

Анализ микроструктуры поверхностного слоя обработанных образцов показывает, что его разрушение при ударе жесткой абразивной дробинкой происходит в результате значительных пластических деформаций, сдвигающих отдельные участки поверхности в пределах зерен. Это приводит к образованию микротрещин и отделению микрообъемов металла.

Таким образом, можно заключить, что из-за высоких контактных напряжений в течение довольно непродолжительного периода времени происходит существенное нарастание скорости распространения микротрещин, которые и приводят к разрушению поверхностного слоя металла при сравнительно небольшом ($< 10^3$) числе циклов импульсного нагружения. Такой механизм импульсного воздействия потока абразива на обрабатываемую поверхность, в результате которого происходит разрушение поверхностного слоя, можно назвать абразивным ударно-усталостным [8].

Рассмотрим изменение интенсивности разрушения поверхностного слоя обрабатываемой поверхности, характеризуемой массой удаленного металла за единицу времени. Исследуемая характеристика оказывается различной для разных фракций дроби. Кроме того, в первые 2...4 с обработки динамика ее изменения оказалась большей, чем в последующий период времени, когда хрупкая окалина с поверхностного слоя была удалена. При этом интенсивность разрушения уже неокисленного металла существенно замедляется и приобретает стабильный характер. Особенно это проявляется при обработке дробью большей фракции, что объясняется разной силой удара крупных и мелких дробинок с примерно одинаковой скоростью их атаки.

Мера разрушения поверхностного слоя образцов после обработки устанавливается с помощью коэффициента разрушения k_p , который, по аналогии с принятым в технологии машиностроения коэффициентом стружкообразования k_c [9], будет

$$k_p = w_m / w_d, \quad (1)$$

где w_m – объем металла, удаленного с поверхности образца одной дробинкой; w_d – объем образованной на поверхности лунки.

Коэффициент разрушения k_p поверхностного слоя испытанных образцов изменяется от 0,1 до 0,2. При этом его большее значение характерно для окисленной поверхности, т.е. с окалиной. Это свидетельствует о том, что отделению металла от обрабатываемой поверхности предшествует значительная пластическая деформация поверхностного слоя образца. На единицу его поверхности, соразмерную с размерами атакующих дробинок, при заданных условиях обработки приходится от нескольких десятков до 1000 ударов. Естественно, что такое число асимметричных циклов пульсирующего пластического деформирования поверхности недостаточно для ее усталостного разрушения, оно должно быть порядка 10^6 . Это вызывает некоторые сомнения в преобладании усталостного механизма разрушения при дробеструйной очистке, что обусловило необходимость рассмотрения механизма разрушения поверхностного слоя в соответствии с теорией соударения жесткого тела с упруго-пластическим полупространством.

Модель взаимодействия абразивного материала с обрабатываемой поверхностью. Рассмотрим некоторые теоретические аспекты моделирования упругопластического ударного взаимодействия дробинки с обрабатываемой поверхностью.

При воздействии дробинки на обрабатываемую поверхность в некотором объеме ее поверхностного слоя начинает распространяться упругая волна сжатия. При этом материал следует закону Гука до тех пор, пока развивающиеся контактные напряжения не превысят динамический предел упругости материала, после чего происходит его пластическое деформирование.

Динамику взаимодействия дробинки как тела с полупространством можно описать векторным уравнением

$$m \left(\frac{d^2 \vec{r}(t)}{dt^2} \right) + \sum_{i=1}^n F_i(\vec{r}(t)) = 0, \quad (2)$$

где $m = m_{др}$ – масса дробинки; $\vec{r}(t)$ – радиус-вектор положения центра масс дробинки в заданной системе координат; $\sum_{i=1}^n F_i(\vec{r}(t))$ – сумма сил сопротивления движению

атакующей дробинки.

В скалярной форме векторное уравнение (2) запишем в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} m \left(\frac{d^2 y(t)}{dt^2} \right) + \sum_{i=1}^n F_{yi}(y(t), x(t)) = 0; \\ m \left(\frac{d^2 x(t)}{dt^2} \right) + \sum_{i=1}^n F_{xi}(y(t), x(t)) = 0, \end{cases} \quad (3)$$

где $F_{yi}(y(t), x(t))$, $F_{xi}(y(t), x(t))$ – нормальная и тангенциальная составляющие силы сопротивления движению атакующей дробинки в выбранной системе декартовых координат.

В общем случае система уравнений (3) описывает взаимодействие дробинки с полупространством, когда вектор ее скорости \vec{v} образует с ним угол $0 < \alpha \leq 90^\circ$. При угле атаки $\alpha \rightarrow 0$ тело перемещается практически поступательно по поверхности полупространства, вследствие чего контактное сопротивление движению практически отсутствует. При $\alpha = 90^\circ$ тангенциальная составляющая сил сопротивления и инерции отсутствует, и движение тела описывается только первым уравнением (3).

При использовании рассматриваемой модели одним из основных моментов является определение сил сопротивления движению атакующей дробинки в (3), зависящих от реальных условий (режимов) технологического процесса обработки. Поскольку при решении этой задачи следует учитывать определяющие факторы такого процесса, возникает необходимость в некоторых упрощениях функциональных зависимостей указанных сил, а следовательно, в использовании разных подходов к формированию уравнений (3). В частности, в модели не учитывается взаимовлияние тангенциальной и нормальной составляющих сил сопротивления, поэтому их функциональные зависимости представим в таком виде:

$$F_{ni}(y(t), x(t)) = F_n(t); \quad F_{ti}(y(t), x(t)) = F_t(t),$$

а система уравнений (3) становится несвязанной.

Внедрение сферического тела характеризуется непрерывным увеличением площади его контакта с основой, что, в свою очередь, приводит к росту сил сопротивления перемещению. Таким образом, имеет место зависимость $F_n(t) = f(y(t))$.

Принимаем, что нормальная составляющая $F_n(t)$ силы сопротивления в процессе углубления дробинки в обрабатываемую поверхность (активная фаза удара) представляет собой комбинацию сил сопротивления упругой и пластической местных деформаций. При чисто упругом контактном взаимодействии зависимость между углублением y атакующего тела и величиной нормальной силы F_n описывается уравнением Герца [10]:

$$F_n = k_1 y^{3/2}. \quad (4)$$

Однако при динамическом внедрении дробинки наблюдается упругопластическая деформация, для которой величину сопротивления деформации представим, по аналогии с (4), так [9]:

$$F_n(t) = ky^c(t). \quad (5)$$

Неизвестные коэффициенты, которые входят в уравнение (5), находятся экспериментально при испытаниях по определению динамической твердости. В частности, как установлено в [10], показатель степени c для стали разных марок практически не зависит от диаметра тела и близок к единице.

Предположив $c = 1$ в уравнении (5), при вертикальном (нормальном) динамическом взаимодействии дробинки с обрабатываемой поверхностью выражение для нормальной силы сопротивления в первом уравнении системы (3) запишем в виде

$$F_y(t) \approx ky(t), \quad (6)$$

где k – упругопластический коэффициент пропорциональности.

Тангенциальное перемещение тела, уже внедренного на элементарную величину, приводит к смятию фронтальной части поверхности контакта, т.е. к преимущественно пластической деформации зоны контакта, которая сопровождается возникновением значительных сил трения. Сила сопротивления $F_x(t)$ тангенциальному перемещению в этом случае также зависит от площади поверхности контакта, которая увеличивается с возрастанием внедрения тела и, как следствие, с ростом нормальной составляющей силы сопротивления. При принятых допущениях выражение тангенциальной составляющей силы сопротивления во втором уравнении системы (3) запишем в таком виде:

$$F_x(t) \approx \mu_s F_y(t) = \mu_s ky(t), \quad (7)$$

где μ_s – приведенный коэффициент трения при пластическом деформировании обрабатываемой поверхности.

Упругопластический коэффициент пропорциональности k в (6) и (7) зависит от физико-механических свойств полупространства и описывает интенсивность его сопротивления упругопластической деформации при нормальном динамическом внедрении дробинки диаметром d как жесткого сферического тела. Для коэффициента k на основании экспериментально-аналитических исследований получено следующее выражение:

$$k \approx \frac{\pi \eta_d HD_{пл}}{d} \left(d - \sqrt{\frac{2T_0}{\pi d \eta_d HD_{пл}}} \right)^2, \quad (8)$$

где η_d – динамический коэффициент, который зависит от скорости столкновения тел, $\eta_d = 2,0 \dots 2,4$; $HD_{\text{пл}}$ – пластическая твердость [10]; T_0 – кинетическая энергия дробинки массой m при скорости атаки $v_0 = v_{0n}$ в начальный момент времени, $T_0 = mv_0^2/2$.

Полученное выражение может быть записано через твердость по Бринеллю (HB) или по Роквеллу (HRB) с учетом известных соотношений $HD_{\text{пл}} = 0,469HB^{1,12}$ и $HD_{\text{пл}} = 88300/(130 - HRB)$.

При принятых допущениях система разрешающих уравнений (3) упругопластической модели взаимодействия дробинки с обрабатываемой поверхностью с учетом (6) и (7) преобразуется к виду

$$\begin{cases} \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + \frac{k}{m} y(t) = 0; \\ \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + \frac{\mu_s k}{m} y(t) = 0. \end{cases} \quad (9)$$

Решение первого уравнения (9) позволяет установить основные соотношения для определения характеристик процесса внедрения по нормали дробинки в обрабатываемую поверхность как упругопластическое полупространство – скорости v_n , глубины y_{max} и времени t_h :

$$v_n(t) = v_{0n} \cos((\sqrt{k/m})t), \quad y_{\text{max}} = h = \frac{v_{0n}}{\sqrt{k/m}}, \quad t_h = \frac{0,5\pi}{\sqrt{k/m}}. \quad (10)$$

Максимальная сила вдавливания дробинки в полупространство в этом случае определяется из выражения

$$F_{n \text{ max}} = ky_{\text{max}} = (2kT_0)^{1/2} = v_{0n} \sqrt{km}, \quad (11)$$

а усредненные нормальные напряжения сжатия при условии распределения сил давления по нормали к плоскости контакта –

$$\sigma_n = \frac{v_{0n} \sqrt{km}}{\pi dh}. \quad (12)$$

Наибольшее напряжение $\sigma_{n \text{ max}}$ в центре площадки контакта можно определить по известным моделям распределения напряжений в зоне контакта или принять в соответствии с [11]:

$$\sigma_{n \text{ max}} = \sigma_3 = 1,5\sigma_i. \quad (13)$$

При косом ударе характер распределения главных напряжений, тем более, что речь идет только о фазе внедрения, предположительно не сильно изменяется. Точка приложения равнодействующей смещается на некоторую величину в сторону движения дробинки, ослабляя давление на заднюю часть сферического участка площадки контакта. Поскольку выражения (12) и (13) использовались для определения предварительных параметров напряженного состояния при дробеструйной очистке по известному значению нормального усилия F_n , результаты решения второго уравнения системы (9) не приводятся.

Сравнение определенных с использованием уравнений (9) значений глубины следа $h_{сл}$, оставляемого дробинкой на поверхности, с экспериментальными данными свидетельствует об удовлетворительной их сходимости. Так, при скорости атаки $v = 100$ м/с и выбранном диаметре дробинки как индентора опытная усредненная глубина следа $h_{сл}$ в виде лунки на поверхности исследуемых образцов составляет $0,75 \cdot 10^{-3}$ м. Теоретическое значение глубины внедрения дробинки в обрабатываемую поверхность, полученное с использованием упругопластической модели, равно $0,69 \cdot 10^{-3}$ м. При больших скоростях атаки погрешность в этих значениях достигает 8%.

Сравнение расчетных значений глубины следа с экспериментальными данными других авторов [10] дало хорошую сходимость и при малых скоростях атаки. Так, при столкновении индентора массой $m = 1,02$ кг и сферической ударной частью диаметром $D = 0,005$ м с плоской поверхностью из стали 20 со скоростью $v = 2$ м/с экспериментальная глубина следа $h_{сл} = 0,33 \cdot 10^{-3}$ м, а теоретическая с использованием (9) – $0,38 \cdot 10^{-3}$ м. Таким образом, расхождение в этих значениях при малой скорости атаки увеличивается и достигает 13%, что является хорошим результатом для экспериментальных исследований подобного типа.

Заключение. Проведенные металлографические и электронно-микроскопические исследования показывают, что технологические режимы дробеструйной обработки с целью очистки поверхности стальных деталей, подвергнутых термической обработке при нормализационном отжиге, оказывают существенное влияние на качество обработанной поверхности (шероховатость, структура, твердость, глубина наклепанного слоя, шаржирование поверхностного слоя осколками дробинки) и дают основание полагать, что скоростное ударно-усталостное разрушение с элементами микрорезания поверхностного слоя преобладает при дробеструйной атаке металлических поверхностей.

На основании результатов исследований установлен упругопластический характер образования микрорельефа поверхности образцов и разработана соответствующая модель упругопластического ударного взаимодействия дробинки с обрабатываемой поверхностью изделия с применением коэффициента (8), который позволяет экспериментально-аналитическим путем учитывать упругопластические свойства обрабатываемого материала.

Незначительное расхождение в результатах сравнения теоретических и экспериментальных значений отдельных параметров поверхности после дробеструйной очистки между собой может служить подтверждением достоверности предложенной модели косоугольного удара летящей дробинки с упругопластическим полупространством.

Резюме

Наведено результати експериментальних досліджень щодо оцінки впливу режимів дробеструйної обробки металевих поверхонь для нанесення захисного неметалевого покриття. Описано методику визначення характеру пружно-пластичного деформування поверхневого шару за допомогою експериментально-аналітичного коефіцієнта, який враховує пружно-пластичні властивості матеріалу оброблюваної поверхні. Представлено результати порівняння експериментальних даних із теоретичними. Викладено припущення щодо можливого механізму руйнування поверхневого шару металевих виробів при дробеструйному впливі.

1. Козлов Д. Ю. Антикоррозионная защита. – Екатеринбург: Феникс, 2013. – 440 с.
2. Маслов Е. Н. Теория шлифования материалов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.

3. *Кащеев В. Н.* Абразивное разрушение твердых тел. – М.: Наука, 1970. – 247 с.
4. *Тадальдер Ю. А.* О механизме разрушения технически чистых металлов при изнашивании в струе абразива // Износ, усталость и коррозия металлов: Тр. Таллинского политехн. ин-та. – 1966. – Сер. А, № 237. – С. 35–40.
5. *Богомолов Н. И.* Исследование деформации металла при абразивных процессах под действием единичного зерна // Тр. ВНИИАШ. – 1968. – № 7. – С. 74–88.
6. *Клейс И. А.* О некоторых закономерностях ударного износа // Вест. машиностроения. – 1967. – № 8. – С. 52–54.
7. *Непомнящий Е. Ф.* Трение и износ под воздействием струи твердых сферических частиц // Контактное взаимодействие твердых тел и расчет сил трения и износа. – М.: Наука, 1971. – С. 190–200.
8. *Виноградов В. Н., Сорокин Т. М., Колокольников М. Г.* Абразивное изнашивание. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.
9. *Горик А. В., Ковальчук С. Б., Шулянский Г. А.* Определение упругопластического коэффициента ударного взаимодействия сферического индентора с деформируемым полупространством // Вост.-европ. журн. передовых технологий. – 2013. – № 1/7 (61). – С. 56–59.
10. *Дрозд М. С., Матлин М. М., Сидякин Ю. И.* Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.
11. *Писаренко Г. С., Агарев В. А., Квитка А. Л. и др.* Сопrotивление материалов. – Киев: Вища шк., 1986. – 775 с.

Поступила 11. 10. 2016