

Кочетков Андрей Викторович

Kochetkov Andrey Viktorovich

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Perm national research polytechnical university

Профессор / professor

Доктор технических наук

E-Mail: soni.81@mail.ru

Барац Фридрих Яковлевич

Barats Friedrich Yakovlevich

ООО «Научно-исследовательский центр технического регулирования»

Open Company «Research center of technical regulation»

Инженер / engineer

E-Mail: soni.81@mail.ru

Шашков Игорь Геннадиевич

Shashkov Igor Gennadiyevich

Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина

Military and air academy of a name of professor N.E.Zhukovskogo and Yu.A.Gagarin

Преподаватель / teacher

Кандидат технических наук

igoshashkov@yandex.ru

05.02.08 Технология машиностроения

Обзор исследований отделочно-упрочняющей обработки методом поверхностного пластического деформирования

The review of researches of finishing strengthening processing by
a method of superficial plastic deformation

Аннотация: Рассматриваются методы исследований отделочно-упрочняющей обработки методом поверхностного пластического деформирования.

The Abstract: Methods of researches of finishing strengthening processing by a method of superficial plastic deformation.

Ключевые слова: Алмаз, индентор, пластическое деформирование, качество, шероховатость, напряжение.

Keywords: diamond, indenter, plastic deformation, quality, roughness, tension.

Введение

Поверхностное пластическое деформирование (ППД) является весьма простым кинематически, высоко эффективным и экономичным способом упрочняюще-калибрующей и отделочно-упрочняющей обработки изделий, с помощью которого удается весьма существенно повысить сопротивление разрушению деталей, работающих в условиях переменных нагрузок или подвергающихся истиранию. В практике ППД успешно применяются дробеструйная обработка, обкатка деталей шариками и роликами,

выглаживание инструментами из сверхтвердых материалов и сплавов, дорнование и раскатка отверстий, гидроабразивная и гидродробеструйная обработка, обработка инструментами ударного действия, нашедшие широкое распространение в нашей промышленности и за рубежом.

Обзор исследований

Одним из наиболее распространенных методов ППД является обкатка изделий шариками и роликами. Изучению процессов обкатки посвящены многие работы отечественных и зарубежных исследований. Хорошо известны работы Кудрявцева И.В., Папшева Д.Д., Шнейдера Ю.Г., Балтер М.А., Гурьева А.В., Бараца Я.И., Масляковой И.Д., Папшевой Н.Д. и других (здесь и далее приводится общая ссылка из обзора [1]).

Экспериментальное исследование и практика внедрения в производство процессов обкатки и выглаживания показывают их высокую эффективность. Эксплуатационные свойства изделий достигаются высокой степенью чистоты отделки поверхности, повышенной опорной способностью поверхности за счет округлой формы микронеровностей, упрочнением поверхностного слоя и образованием в нем благоприятных остаточных напряжений.

При отделочно-упрочняющей обработке происходит образование новой поверхности с шероховатостью, зависящей от основных параметров процесса. Схема пластического деформирования микронеровностей в результате обкатки представлена на рис.1. Микрогеометрия при обкатке определяется характером деформации исходных неровностей, это связано с направлением равнодействующей P сил P_1 и P_2 . В реальных условиях обработки угол α весьма мал, направление радиальной составляющей практически совпадает с направлением равнодействующей, что и определяет характер деформирования исходных микронеровностей: последние раскатываются в обе стороны от вершин индентора и заполняют смежные впадины. Величина остаточной деформации и изменение диаметрального размера Δd приближенно могут быть вычислены по формуле Чепя П. А.:

$$\Delta d \approx 1,4(R_{ucx} - R_z), \quad (1)$$

где R_{ucx} - высота исходных микронеровностей; R_z - высота неровностей после ППД.

Погрешность вычисления Δd в основном может иметь место за счет упругого восстановления и перераспределения объемов металла в очаге деформации, которые здесь не учитываются. Исследования, выполненные Папшевым Д.Д., Михиным Н.М. показывают, что пренебрежение величиной упругой деформации в процессе обкатки может привести к значительным погрешностям. Большие погрешности возникают в условиях обработки, при которых происходит неполное сминание исходных микронеровностей. В этом случае пренебрежение упругим восстановлением недопустимо. Высота микронеровностей с учетом их упругой деформации (по Папшеву Д.Д.) может быть определена по формуле:

$$R_z = \left[\frac{S^2}{R_{ш}} - \frac{(K-1)^2}{K} - \frac{S^2}{16 R_{ш}} \right], \quad (2)$$

где S – подача; $R_{ш}$ - радиус шарика; K - коэффициент, характеризующий увеличение радиуса впадины в результате упругого восстановления.

Как показали исследования Кан Р., представление о микропрофиле, как о следе рабочего движения инструмента (шарика или ролика) при обкатке, является неточным также и вследствие искажений, вызываемых пластическим течением металла в приконтактной зоне.

Пластическое течение происходит в направлении подачи с образованием волны, перемещающейся вместе с инструментом, а также и в обратном направлении, что приводит к искажению образованной ранее соседний микропрофиль. На рис.1 представлена схема последовательного образования микропрофиля, составленная Папшевым Д.Д. по профилограммам, снятым при обкатке шариком.

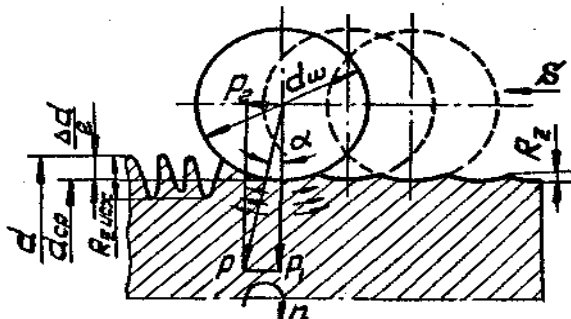


Рис. 1.

При проходе след, оставляемый шариком на поверхности заготовки, представляют собой канавку с выпуклостями по краям (рис.2,а). При втором проходе в связи со смещением шарика на величину подачи образуется вторая канавка (рис.2,б), глубина которой несколько больше первой, что является следствием уменьшения поверхности контакта индентора с изделием и в результате – увеличение удельного давления в очаге деформации. Образование последующих следов обработки показано на рис.2,б, и 2,г. Схема дает представление об искажении ранее образовавшегося микропрофиля. Величина искажения характеризуется зоной пластического смещения металла, возникающей в направлении, противоположном направлению движения подачи. Происходит поднятие вершины образовавшейся неровности и смещение её в сторону обработанной поверхности.

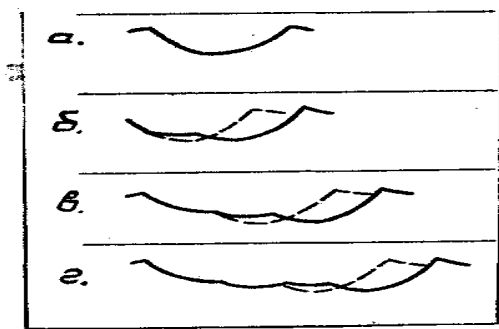


Рис. 2.

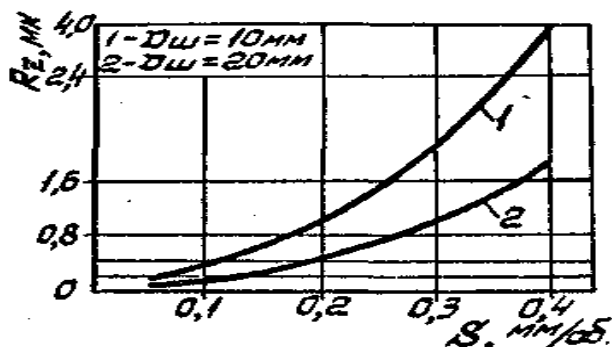


Рис. 3.

На высоту возникших в результате ППД микронеровностей оказывают влияние радиальное усилие, продольная подача, размеры и форма исходной поверхности деформирующего инструмента, исходная шероховатость поверхности, физико-механические свойства материала детали, число проходов и ряд других факторов.

Основные из них должны быть учтены при назначении режимов, обеспечивающих получение заданного класса шероховатости поверхности. Наибольшее влияние на шероховатость обработанной поверхности оказывает радиальное давление.

Минимальные неровности образуются при некотором оптимальном давлении, обеспечивающем полное пластическое деформирование исходных неровностей. Для пластичных металлов оптимальное давление имеет меньшее значение, чем для более твердых

и менее пластичных металлов. При давлениях превышающих оптимальное значение, происходит возрастание высоты неровностей. Это объясняется искажением профиля, а также перенаклепом верхнего слоя, вызывающим его частичное разрушение.

Влияние при обкатке подачи и диаметра шарика на шероховатость поверхности показано на рис.3.

Изменение подачи и размеров деформирующего инструмента может в значительной степени повлиять на качество обработки. При обкатке пластичных сталей с давлением, близким к оптимальному, исходные неровности в пределах до 15 мкм не оказывает заметного влияния на шероховатость поверхности. При обработке более грубой поверхности исходные шероховатости полностью не деформируются, в результате чего резко ухудшается качество обработки. Незначительное влияние на шероховатость упрочненной поверхности оказывает окружная скорость ППД. Опытные данные Чепы П.А. показывают, что из условий жесткости и виброустойчивости оборудования, а также инструмента, наиболее целесообразно проводить упрочнение со скоростью 50-150 м/мин [1].

Некоторое влияние на шероховатость обработанной поверхности оказывает количество повторных подходов. Наибольшее снижение исходных шероховатостей происходит за первый проход. Последующие подходы менее эффективны.

Основным фактором, определяющим упрочнение поверхностного слоя, является удельное давление в процессе ППД. Большую роль в упрочнении играют также физико-механические свойства и состояние обрабатываемого материала. Давление в очаге деформации, при котором прекращается прирост микротвердости, примерно соответствует верхнему пределу оптимальных усилий, обеспечивающих получение минимальных шероховатостей. Оптимальные усилия с точки зрения упрочнения являются одновременно и наиболее рациональным с точки зрения снижения исходных шероховатостей.

При расчете деформаций и напряжений, вызванных взаимодействием тел произвольной кривизны, эллиптическую форму пятна контакта условно представляют равновеликим кругом с радиусом $R = \sqrt{lb}$, где l и b - полуоси эллиптической площадки контакта. Это допущение, как показывают исследования Кудрявцева И.В., не вызывает существенных погрешностей в расчетах, но значительно облегчает вычислительную сторону аналитического исследования. Приведенный радиус пятна контакта R может быть определен по формуле Герца:

$$R = \sqrt[3]{\frac{3PR_u}{4} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)}, \quad (3)$$

где P - радиальное усилие при ППД; ν_1 и ν_2 - коэффициенты Пуассона соответственно материалов изделия и инструмента; E_1 и E_2 - модули упругости этих материалов.

Радиус индентора R_u может быть определен по Дилигенскому Н.В. как параметр инструмента, при котором интенсивность давления σ_0 в центре площадки контакта тел произвольной кривизны равна интенсивности давления σ_0^1 в центре площадки контакта шара с полуограниченным телом, если в обоих случаях сочетание материалов контактирующих тел и радиальное усилие одинаковы.

Интенсивность давления σ_0 при упругом контакте двух тел, ограниченных поверхностями произвольной кривизны, рассчитывается по формуле:

$$\sigma_0 = \frac{n}{\pi} \sqrt[3]{\frac{2}{3}} P \left(\frac{\sum K}{\eta} \right)^2, \quad (4)$$

где $\sum K = K_{11} + K_{12} + K_{21} + K_{22}$ - сумма главных кривизн контактируемых тел; n - коэффициент, зависящий от главных кривизн;

$$\eta = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}.$$

Интенсивность давления σ_0^1 при упругом контакте шара радиуса R_u с полуограниченным телом может быть определено по формуле Герца:

$$\sigma_0^1 = \frac{3P}{2\pi} \left[\frac{3PR_u}{4} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \right]^{-2/3}. \quad (5)$$

Если упругие свойства обоих тел одинаковы ($E_1 = E_2$ и $\nu_1 = \nu_2 = 0,3$), то формулы (4) и (5) упрощаются:

$$\sigma_0 = \alpha \sqrt[3]{4PE^2 A^2} \quad \text{и} \quad \sigma_0^1 = 0,338 \sqrt{\frac{PE^2}{R_u^2}}.$$

Приравнивая правые части полученных соотношений, можно найти:

$$R_u = \frac{1}{2A} \sqrt{\left(\frac{0,338}{\alpha} \right)^3}, \quad (6)$$

где $\alpha = \alpha (A/B)$; A и B - коэффициенты, зависящие от главных кривизн контактирующих тел.

Коэффициент α определяют по графикам рис.4. Коэффициенты A и B в общем случае контакта тел двойной кривизны определяют в соответствии с данными на рис.5.

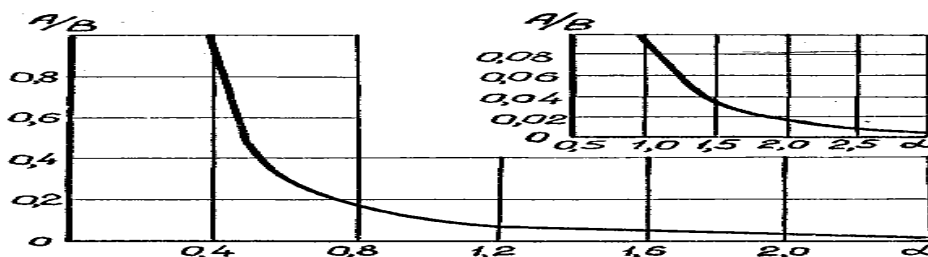


Рис. 4.

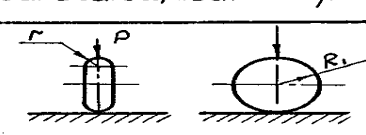
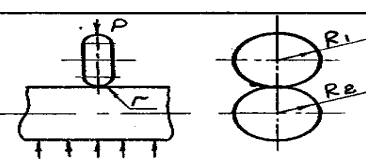
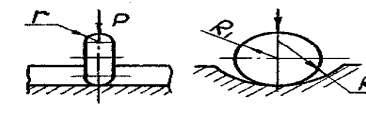
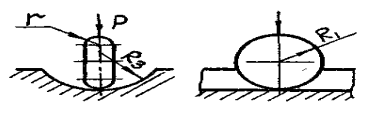
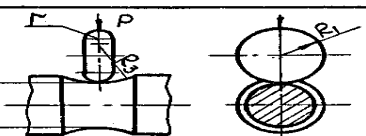
Соприкасающиеся поверхности	$A \ll B$ или $B \ll A (A < B)$
	$\frac{1}{2r}; \frac{1}{2R_1}$
	$\frac{1}{2r}; \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$
	$\frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right); \frac{1}{2r}$
	$\frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R_3} \right); \frac{1}{2R_1}$
	$\frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R_3} \right); \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$

Рис. 5.

Выражение (6) получено Дилигенским Н.В. с использованием зависимостей, имеющих место при чисто упругом контакте. Как показали опытные данные, полученные при большом количестве экспериментов с учетом различных условий упругопластического контакта, роль кривизны контактирующих тел в формировании контактных напряжений практически одинакова как при чисто упругом, так и при упруго-пластическом силовом взаимодействии двух тел. В условиях упруго-пластического контакта радиус площадки контакта при взаимодействии шара с полуограниченным телом или приведенный радиус площадки контакта при взаимодействии тел произвольной формы и кривизны может быть с достаточной для практики ППД точностью рассчитан с помощью соотношения (3).

Глубина проникновения пластических деформаций может быть определена экспериментально: по границе помутнения полированной поверхности разъема составных образцов или по распределению твердости под отпечатком в монолитном образце [27] и путем аналитического расчета. Для расчета глубины наклепанного слоя предложено ряд формул. По формуле Кудрявцева И.В. толщина пластически деформируемого металла:

$$\Delta = 3RK \quad (7)$$

где R - радиус пластического отпечатка;

$$K = \frac{1}{\varepsilon} \sqrt{2 - (1 - \sqrt{1 - \varepsilon_2})}$$

- коэффициент, зависящий от степени наклепа $\varepsilon = \frac{R}{2R_n}$, R_n - радиус приведенной кривизны для сферы радиусом R_U .

По формуле Хейвеца С.Г. [1]:

$$\Delta = \sqrt{\frac{P}{2\sigma_s}}, \quad (8)$$

где σ_s - предел текучести материала обрабатываемой детали.

В случае малых значений приведенной кривизны соприкасающихся поверхностей:

$$\frac{1}{R_{np}} = \frac{1}{R_U^I} + \frac{1}{R_U^{II}} + \frac{1}{R_g^I} + \frac{1}{R_g^{II}},$$

где $R_U^I; R_U^{II}$ и $R_g^I; R_g^{II}$ - главные радиусы кривизны соответственно инструмента и обрабатываемой детали, формула Хейфеца С.Г. требует поправки:

$$\Delta = \frac{I}{m} \sqrt{\frac{P}{2\sigma_s}},$$

где $m = 1 + 0,07R_n$.

Формула, которую предложили Дрозд М.С. и Федоров А.В., имеет вид:

$$\Delta = 5,5h \frac{D_{np}}{d_{np}}. \quad (9)$$

где D_{np} - приведенный диаметр шара; h и d - глубина и приведенный диаметр остаточного отпечатка.

Для определения значения Δ Барацем Я.И. предложена формула, учитывающая микронеровности упрочняемой поверхности:

$$\frac{\pi R^2 \sigma_s}{2P} = 1 - 2 \frac{\Delta^2}{R^2} + \frac{2 \frac{\Delta^3}{R^3}}{\sqrt{\frac{\Delta^2}{R^2} + 1}}; \quad (10)$$

при неучете исходных шероховатостей это выражение принимает вид:

$$\Delta = \sqrt{\frac{3P}{2\pi \sigma_s} - R^2} \quad (11)$$

Аналитическая зависимость (11) хорошо коррелируется с приведенными выше соотношениями. Формула (8) практически совпадает с выражением (11) при малых размерах контактной поверхности, когда величиной R за малостью можно пренебречь.

В зависимости от физико-механических свойств обрабатываемого материала и режимов обработки глубина упрочненного слоя может измениться в широких пределах – от 0,2 до 25 мм, а твердость поверхностного слоя может быть увеличена на 40-50% по сравнению с исходной.

При ППД методом обкатки в поверхностном слое возникают весьма значительные сжимающие напряжения. Установлена положительная роль сжимающих напряжений на

поверхности в повышении прочности деталей, работающих на усталость.

Эффективность этих напряжений во многом зависит от их величины и распределения в поверхностном слое.

Основными параметрами процесса ППД, оказывающими наиболее значительное влияние на остаточные напряжения при обкатывании, являются радиальное давление и размер деформирующего элемента. Этими параметрами, главным образом, и определяется удельная нагрузка, которая должна быть приложена в процессе обкатки для получения необходимого качества упрочненной поверхности.

На рис.6 показаны кривые, полученные Чепя П.А., характеризующие остаточные напряжения в поверхностном слое изделия при обработке стали 45 различными способами: шлифованием (кривая 1- круг ЭБ60СТ1К, $t = 0,005$ мм/дв. ход, $S = 0,2$ мм/об); точением твердосплавным резцом Т15К6 (кривая 2 - $V = 102$ м/мин., $S = 0,07$ мм/об, $t = 0,5$ мм), виброобкатыванием (кривая 3 - $d_{ш} = 8$ мм, $P = 600$ Н; $V = 97$ м/мин, число двойных ходов шарика $n = 4200$ в минуту, амплитуда колебания шарика $a = 3,5$ мм); обкатыванием (кривая 4 - $d_{ш} = 8$ мм, $P = 600$ Н, $S = 0,07$ мм/об; $V = 97$ м/мин).

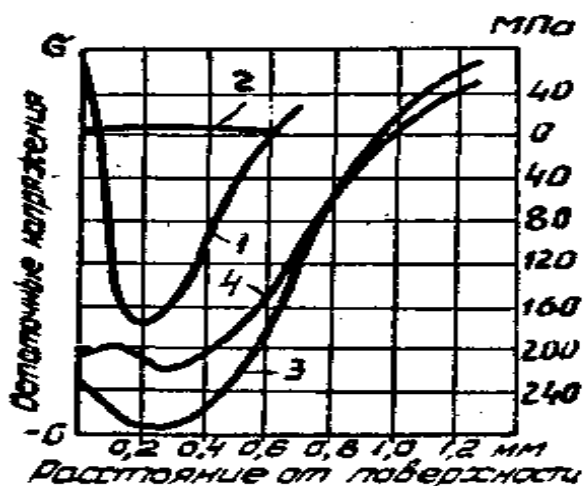


Рис. 6.

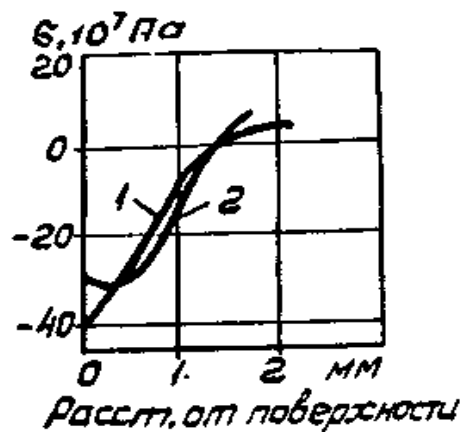


Рис. 7.

При полустачковом точении ($R_z=13,25$ мкм) растягивающие напряжения незначительны, при шлифовании ($R_z=2,3$ мкм) небольшие растягивающие напряжения переходят по мере удаления от поверхности в сжимающие, максимальное значение которых достигает 180 Н/мм². При чистовом обкатывании ($R_z = 2$ мкм) сжимающие напряжения на поверхности достигали 210 Н/мм², а по мере удаления от поверхности их значения увеличились до величины 300 Н/мм² с последующим плавным снижением и переходом в растягивающие.

С увеличением давления сжимающие напряжения у поверхности снижаются, а их максимум оказывается сдвинутым в глубину от поверхности изделия. Чрезмерное повышение радиального усилия вызывает дальнейший спад напряжений на поверхности и смещение их максимума при одновременном увеличении глубины залегания. Результаты исследования влияния скорости обкатки на остаточные напряжения показывают, что применение высоких скоростей вызывает снижение сжимающих напряжений на поверхности изделия.

На рис.1-7 приведены графики Агарева В.П. зависимости остаточных напряжений от скорости обработки (при обкатке стали 45 ($d_{ш}=10$ мм, удельное давление $g = 1750$ Н/мм²; кривая 1- $V = 3,5$ м/мин, кривая 2 - 185 м/мин). Имеющийся спад сжимающих напряжений на поверхности Папшев Д.Д. объясняет наличием высокого градиента термических напряжений, который возникает при высоких контактных температурах.

Исследование температурных полей в изделии позволили Папшеву Д.Д. определить глубину, где термические напряжения достигают предела текучести материала детали. Полученная для этой цели аналитическая зависимость имеет вид:

$$Z_{ш} = \left[\frac{0,736qE \cdot \alpha(t)}{\pi \nu c \gamma \sigma_{02}} \right]^{1/2}, \quad (12)$$

где $\alpha(t)$ - истинный коэффициент линейного расширения.

Исследованиями Бараца Я.И. установлена важная роль формы рабочей поверхности инструмента в формировании остаточных напряжений при отделочно-упрочняющей обработке.

На рис.8, 9, 10 приведены результаты исследования осевых σ_0 и тангенциальных σ_r остаточных напряжений, полученных при упрочнении изделий из стали 45 многошариковым, одношариковым и многороликовым обкатными инструментами.

При обработке шестишариковым инструментом (рис.8) $d_{ш} = 8,5 \text{ мм}$, $S = 0,15 \text{ мм/об}$, $n = 630 \text{ об/мин}$.) эпюры остаточных напряжений имеют характерную петлевидную форму с подповерхностным максимумом; увеличение размера шарика до 20 мм в одношариковом обкатном инструменте (рис.9, $S = 0,2 \text{ мм/об}$, $n = 630 \text{ об/мин}$) несколько сглаживает экстремальность эпюр в направлении скорости обработки и движения подачи.

При упрочнении многороликовым обкатным инструментом с коническими роликами диаметром 10 мм (рис.10) характер эпюр остаточных напряжений отличается от таковых при обработке шариковыми инструментами.

На рис.10 кривыми 1; 2; 3; 4; 5 и 6 соответствуют натяги роликов в инструменте величиной 0,04; 0,09; 0,128; 0,165; 0,2 и 0,272 мм.

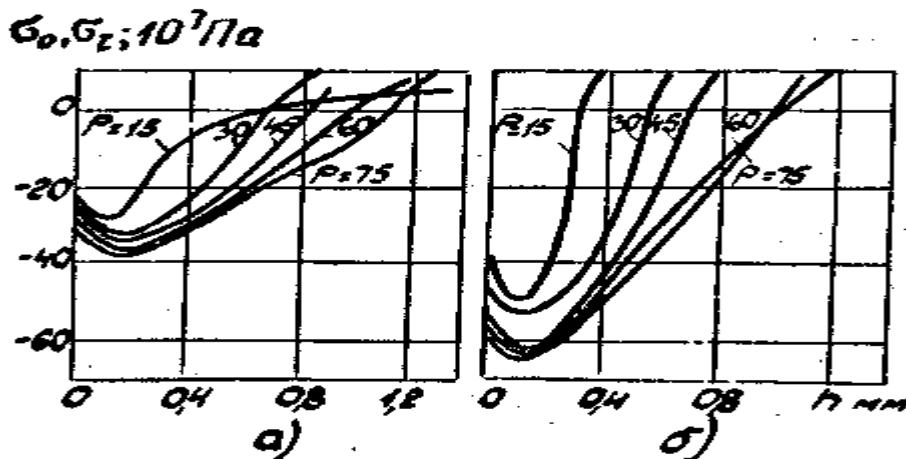


Рис. 8.

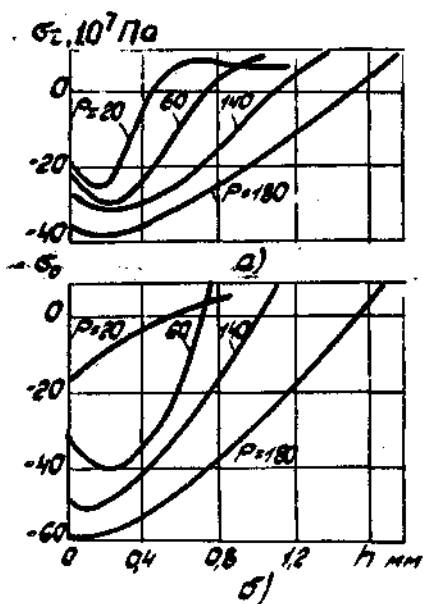


Рис. 9.

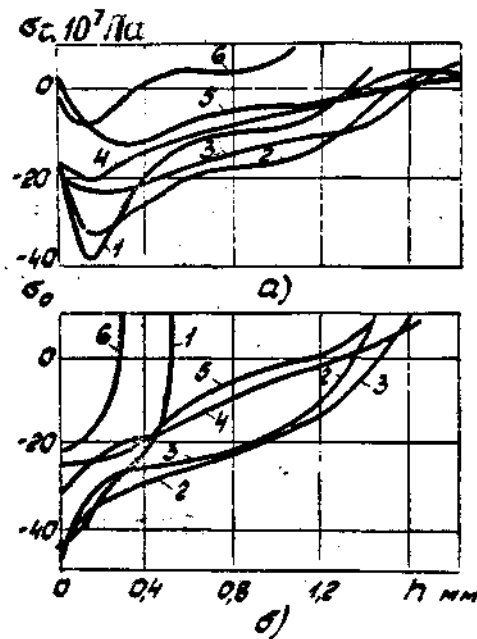


Рис. 10.

На характер распределения остаточных напряжений сильно влияет кривизна рабочей поверхности индентора, причем уменьшение кривизны приводит, как правило, к снижению величины подповерхностного максимума или полностью исключению его. Спад остаточных напряжений на поверхности изделий и возникновение максимума на некотором расстоянии от нее может иметь место за счет влияния поверхностных температурных напряжений.

Отмечена более высокая температура при обработке многороликовым инструментом и при этом тангенциальные напряжения имели наибольшие спады на поверхности, а осевые напряжения имели на поверхности наибольшее значение (рис.10). Делается предположение, что в образовании максимума под поверхностью основную роль играет упругое восстановление поверхностного слоя.

Чепя П.А. и Андрияшин В.А. дают следующее объяснение этому: при обкатывании деталей роликами величина упруго-пластического контакта в окружном направлении сравнительно невелика, и имеется возможность упругого восстановления, вследствие чего появляется спад σ_τ к поверхности; в осевом направлении величина контакта ролика с деталью на порядок выше, чем в окружном, и упругое восстановление затруднено, в этом случае поверхностный слой деформируется с одинаковой степенью и не наблюдается спада σ_0 к поверхности. Подобное явление бывает при упрочнении шариком большого диаметра с усилиями $P = 1400, 1800$ Н (рис.9); при обкатывании шариком малого диаметра, когда величины контактов шарика с деталью в обоих направлениях примерно равны, наблюдается устойчивое образование максимума под поверхностным слоем.

Для расчета температуры в любой точке полубесконечного тела при его нагреве движущимся нормально-сферическим источником мощностью

$$q = q_m e^{-k} R^2 \quad (13)$$

Было получено следующее решение:

$$\theta(x, y, z, t) = \frac{q}{4\pi ac\gamma R} \exp\left(-\frac{ux}{2a}\right) \left[1 + \phi\left(\frac{z}{2} \sqrt{\frac{t_0}{at(t_0-t)}}\right)\right] \times \quad (14)$$

$$\times \left\{ \exp\left(\frac{vR}{2a}\right) \left[\phi\left(\frac{R+vt_0}{2\sqrt{at_0}}\right) - \phi\left(\frac{R+vt_0+ut}{2\sqrt{a(t_0+t)}}\right) \right] + \exp\left(-\frac{vR}{2a}\right) \left[\phi\left(\frac{R-vt_0}{2\sqrt{at_0}}\right) - \phi\left(\frac{R-vt_0-ut}{2\sqrt{a(t_0-t)}}\right) \right] \right\}.$$

где a - коэффициент температуропроводности; $c\gamma$ - объемная теплоемкость t_0 - постоянная времени; t - время, для которого определяется температура точки; v - скорость перемещения источника; K - коэффициент сосредоточенности источника.

Для многих случаев обкатки тепловой источник считался быстродвижущимся. В такой постановке задачи температура точек тела, расположенных в непосредственной близости к оси его перемещения, рассчитывалась по формуле:

$$\theta(y, z, t) = \frac{q}{2\pi\lambda v(t_0+t)} \exp\left[-\frac{y^2+z^2}{4a(t_0-t)}\right] \quad (15)$$

где λ - коэффициент теплопроводности

Расчет температуры при обработке реальных цилиндрических деталей производился по схеме быстродвижущегося источника. Цилиндрическое тело приводилось к расчетной схеме путем развертки цилиндра в эквивалентную в тепловом соотношении пластину. Влияние ограниченности пластин учитывалось действием отраженных источников.

Движение источника по винтовой линии заменялось кольцевыми витками с интервалом во времени:

$$t = \frac{2\pi R_{II}}{v},$$

где R_{II} - радиус цилиндра.

В соответствии с выбранной схемой, температура точки определялась суммарным циклическим воздействием множества источников теплоты, перемещающихся по пластине и смещенных друг относительно друга по оси Y на величину подачи S . Расчетная формула была получена в виде соотношения:

$$\theta(R, \gamma, t) = \frac{q}{2\pi\lambda v} \sum_{i=1}^m \frac{\exp\left\{-\frac{Z^2 + [(i+I)S \pm Y]^2}{4a[t_0 + t(i-1)t^i]}\right\}}{t_0 + t(i-1)t^i}, \quad (16)$$

где Z и Y - координаты основных точек; t^i - время одного оборота изделия; m - количество оборотов источника, учитываемое при расчете.

Результаты аналитического исследования температурных полей, подтвержденные экспериментальными данными (измерение температуры производилось полуискусственной закладной термопарой (изделие-электрод) показали, что температурное поле в изделии характеризуется высоким градиентом. Температура у поверхности изделия при отделочно-упрочняющей обработке достигала 150-350°C.

Исследование тепловых явлений процесса обкатки, выполненное Папшевым Д.Д., позволило разрешить частный случай, поэтому результаты анализа не могут быть использованы для широкого круга теплофизических задач ППД методом обкатки и выглаживания. Весьма существенное упрощение математической модели по сравнению с реальным процессом состоит прежде всего в неучтении инструмента, его формы и размеров, пренебрежение условиями теплообмена и окружающей средой, формой и размерами контактной поверхности и рядом других особенностей процесса, которые могут исказить действительное температурное поле. Пренебрежение тепловым потоком в инструмент сказывается наиболее существенно на контактных температурах.

Такое допущение может привести к погрешности еще и потому, что при обкате происходит вращение инструмента – шарика и ролика. В пределах одного оборота фиксированная точка контактной поверхности инструмента выходит из прикосновения с изделием, успевает отдать теплоту в окружающую среду и уже охлажденной возвращается в область контакта с изделием.

Анализ теплофизики резания круглыми вращающимися резцами, выполненный Резниковым А.Н., который с известными оговорками можно перенести на рассматриваемый процесс, показывает, что в подобных случаях имеет место исключительно интенсивное охлаждение области контакта взаимодействующих тел, а вызванное этим снижение температуры контактных поверхностей не может быть достигнуто ни одним из методов искусственного охлаждения.

Повышение контактных температур выше допустимых пределов сказывается не только на упроченной поверхности, но и на прочности обкатного инструмента. Особенно это может сказаться при большой продолжительности процесса, в результате которой происходит значительное накопление теплоты в инструменте и повышении его температуры. Вызванное этим снижение твердости и контактной прочности индентора, как правило сказывается на эффективности упрочнения, стойкости инструмента и в результате на производительности процесса.

Анализ технологии алмазного выглаживания

Применение природных алмазов для обработки ППД качественно изменяет этот процесс. Создается возможность получить исключительно высокий класс чистоты поверхности почти на всех пластичных металлах и сплавах любой твердости. Усилие, с которым осуществляется процесс выглаживания алмазом, позволяют обрабатывать тонкостенные и маложесткие изделия при этом упрочняется поверхностный слой и в нем образуются остаточные сжимающие напряжения. Все это становится возможным благодаря исключительным физико-механическим и эксплуатационным свойствам алмаза, как инструментального материала.

Алмаз обладает высокой теплопроводностью. Коэффициент теплопроводности его более, чем в два раза превышает коэффициент теплопроводности твердого сплава ВК8, в пять раз выше, чем стали Р18 и сплава Т15К6, десятки раз превышает коэффициент теплопроводности минералокерамики.

Высокая теплопроводность алмаза при использовании его в качестве инструментального материала обеспечивает хороший теплоотвод из зоны обработки, вследствие чего на контактных поверхностях имеют место сравнительно меньшие температуры, чем при выглаживании другими инструментальными материалами. Благоприятный термический режим в области контакта создается также благодаря высокой теплоемкости алмаза.

Кристалл алмаза обладает низким коэффициентом трения по металлической поверхности (около 0,05). Исключительно высокая чистота, с которой может быть отполирована его рабочая поверхность, чрезвычайная прочность и износоустойчивость, делают алмаз незаменимым инструментальным материалам для выглаживания. Вместе с тем, при эксплуатации алмазных инструментов должны быть учтены их особенности. Алмаз обладает резко выраженными свойствами анизотропии. Его прочность и твердость неодинаковы в различных направлениях. Условно различают «мягкие» и «твердые» направления в кристаллах. По «мягким» направлениям алмаз обрабатывается легче, но сильнее изнашивается, чем по «твердым». Поэтому при изготовлении инструментов алмаз ориентируют таким образом в оправке, чтобы его обработка велась в «мягком» направлении, а изнашивание в процессе эксплуатации – в «твердом» направлении.

Несовпадение свойств алмаза по различным кристаллографическим осям сказывается не только на обрабатываемости кристаллов, но и на силе их сцепления при контактировании с другими материалами. Коэффициент трения алмаза по стали в «твердом» направлении значительно ниже, чем в «мягком». При эксплуатации алмазных инструментов необходимо учитывать теплостойкость, которая для алмаза имеет известный предел. Нагревание кристалла алмаза до температуры 700-750°С приводит к интенсивному разрушению контактной поверхности. Поэтому при назначении режимов обработки радиальное усиление и, особенно, скорость выглаживания должны быть выбраны с таким расчетом, чтобы температура на контактной поверхности инструмента не превышала бы опасного для кристалла алмаза предела.

Рабочая поверхность выглаживающих инструментов выполняется обычно в виде части поверхности цилиндра, сферы, кругового тора или конуса, для чего используют алмазы с кристаллами имеющие форму ромбододекаэдра или октаэдра.

Вопросу исследований процесса выглаживания изделия алмазными инструментами посвящены ряд работ отечественных и зарубежных авторов. Первые исследования процесса были выполнены И.Холлом. Выглаживание алмазов изучалось также Чекиным Г.И., Торбило В.М., Маркусом Л.И., Смелянским В.Н., Грановским Э.Г., Хворостухиным Л.А., Мамаевым И.И. и другими исследователями.

Холл для исследования процесса выглаживания использовал алмазные инструменты с цилиндрической и сферической рабочими поверхностями. Упрощенная схема ППД приведена на рис.11 (1- сечение рабочего участка поверхности инструмента, 2- поверхность до выглаживания S – подача). Исследования Холла показали, что в процессе выглаживания непосредственно перед инструментом по бокам и под ним происходит сжатие и пластическая деформация металла, который после прохода инструмента разгружается от напряжений не превышающих предел упругости. Впадины, находящиеся между гребнями микронеровностей, если они не очень глубоки, заполняются металлом гребней текущим в результате воздействия инструмента. На рис.11 сплошной и пунктирной линиями показано взаимное положение остающихся на поверхности изделия следов инструмента при двух последующих проходах.

Для изучения деформации поверхностных неровностей и процесса образования выглаженной поверхности Чекин Г.И. снимал профилограммы мест перехода от обработанной поверхности к исходной (рис.12). На профилограмме можно выделить четыре характерных участка: А – выглаженная поверхность. На ней видны микроволны со скругленными вершинами с шагом, равным подаче инструмента; Б – участок контакта обрабатываемой поверхности с рабочей поверхностью выглаживающего инструмента; В – участок исходной поверхности приподнятый выглаживающим инструментом; Г – исходная поверхность изделия.

Шероховатость выглаженной поверхности также, как и при обкатке, определяется величиной исходных микронеровностей, физико-механическими свойствами материала детали, размерами и формой рабочей поверхности инструмента, режимами обработки.

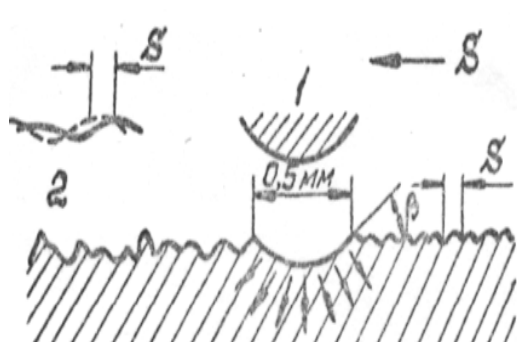


Рис. 11.

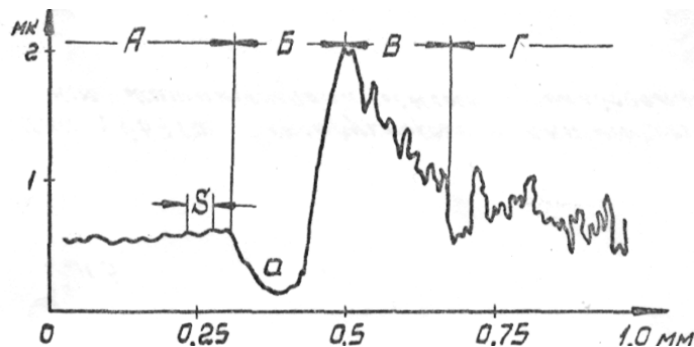


Рис. 12.

ППД алмазными инструментами дает хорошие результаты при обработке почти всех металлов. Исключением являются детали из титана.

Наибольшее влияние на шероховатость упрочненной поверхности, как и при обкатке, оказывает радиальное усилие. Оптимальное значение этого усилия зависит от механических свойств металла, от формы и размеров инструмента и других параметров процесса. Для расчета оптимального значения радиального усилия Чекиным Г.И. получена формула:

$$P = k H_D \left[\frac{D R_c}{D + R_c} \right], \quad (17)$$

где k - коэффициент, определяемый опытным путем, $k = 0,0013$ для закаленных сталей и $h = 0,008$ для незакаленных сталей, H_D - твердость обрабатываемой поверхности в Н/мм²; D - диаметр обрабатываемого изделия; R_c - радиус сферы рабочей поверхности инструмента.

Проверка соотношения (17) для различных материалов показала, что рассчитанные значения усилий от экспериментальных отличаются в среднем на 15- 20 %. Для процесса ППД алмазными инструментами характерны сравнительно небольшие значения силы P , которые в общем случае находятся в пределах от 50 до 300 Н.

Важным параметром процесса выглаживания является подача, которая обычно берется в пределах от 0, 005 до 0,10 мм/об. Величина подачи зависит от формы и размеров инструмента. Как правило, чем меньше подача, тем выше чистота обработанной поверхности. Однако, как показывают исследования, при подачах меньше 0,005-0,01 мм/об. Качество обработки может снизиться вследствие чрезмерной повторяемости нагрузки на одном и том же участке поверхности.

Увеличение числа проходов при ППД влияет на шероховатость обработанной поверхности подобно уменьшению подачи. При исследовании влияния числа проходов было замечено, что наибольшая эффективность достигается при первом проходе. Повторные проходы могут несколько улучшить состояние поверхности; при большом числе проходов наблюдается ухудшение чистоты поверхности вследствие многократности действия нагрузки.

Исследования, выполненные И. Холлом, Чекиным Г.И., Иоффе М.М., Торбило В.М. и другими авторами, показывают, что скорость выглаживания практически не влияет на микрорельеф упрочненной поверхности. Это обстоятельство подтверждается исследованиями авторов [2-5]. Однако, при больших скоростях могут возникнуть вибрации, ухудшающие качество обработки и снижающие стойкость инструмента. Наиболее общим критерием,

служащим для ограничения скорости обработки, может быть температура, возникающая на контактной поверхности алмаза.

Многочисленными исследованиями установлено, что выглаживание алмазными инструментами сопровождается значительным упрочнением поверхностного слоя и возникновением в нем сжимающих остаточных напряжений. Степень повышения твердости зависит от структуры обрабатываемого материала, его склонности к упрочнению. Для закаленных сталей микротвердость поверхности повышается в среднем на 25-50 %, для незакаленных – на 10-20%. В упрочненной поверхности возникают весьма значительное сжимающее остаточное напряжение, близкие по величине к пределу упругости материала изделия. Исследования показывают, что чем прочнее материал, тем выше уровень напряжений.

Исследования Беляева А.С., выполнение по методу Давиденкова Н.Н., показали, что независимо от вида предварительной обработки и знака остаточных напряжений, после выглаживания алмазными инструментами высокопрочных сталей 30ХГСНА, ЭИ643, ВКС-210 в поверхностном слое глубиной до 250-350 мкм формируются остаточные сжимающиеся напряжения. При этом напряжения в направлении главного движения достигают максимума ($\sigma_r = 750 - 920 \text{ Н/мм}^2$) на глубине 40-90 мкм и уменьшаются до 150-200 Н на поверхности. Максимум сжимающих напряжений σ_0 в направлении движения подачи находился почти на самой поверхности. Различие форм эпюр и значений σ_r и σ_0 , различие характера и изменения по глубине упрочненного слоя Беляева А.С. объясняет специфическими способностями пластических деформаций, происходящих преимущественно под действием силового фактора в сочетании с тепловыми явлениями.

И. Холл определял остаточные напряжения в поверхностном слое методами дифракционной рентгеноסקопии. В качестве испытуемого образца использовался предварительно обработанный призматический брусок из хромистой стали, одна плоскость которого дополнительно обрабатывалась алмазным инструментом на поперечно-строгальном станке. Сначала определялось остаточное напряжение на выглаженной поверхности. Затем методом электролитического полирования с поверхности снимался тонкий слой металла и вновь измерялось остаточное напряжение.

Результаты измерения напряжений повторялись до снятия металла на глубину залегания остаточных напряжений. Результаты измерения напряжений представлены на рис.13 (кривая 1 - остаточные напряжения, в направлении, перпендикулярном перемещению инструмента; кривая 2 - в направлении перемещения инструмента). На глубине 0,225 мм от поверхности имело место максимальное значение σ_r равное 421,8 Н/мм². Наибольшее значение сжимающих напряжений σ_0 было зафиксировано на поверхности изделия, величина их составляла 703,1 Н/мм². Как видно из графиков, остаточные напряжения, измеренные в направлении перемещения инструмента, имеют меньшее значение на поверхности, чем на некотором расстоянии от нее. Здесь так же, как и при обкатке, наблюдается характерный для сферического индентора под поверхностный максимум тангенциальных напряжений.

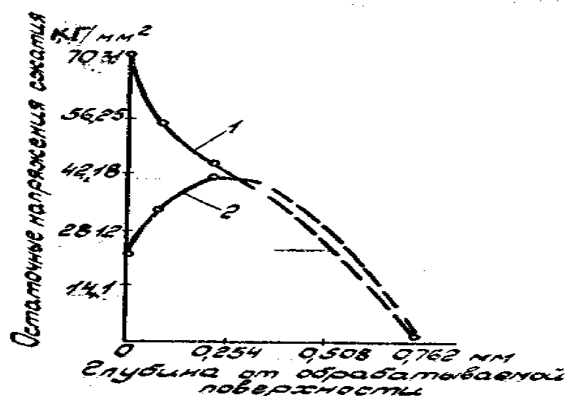


Рис. 13.

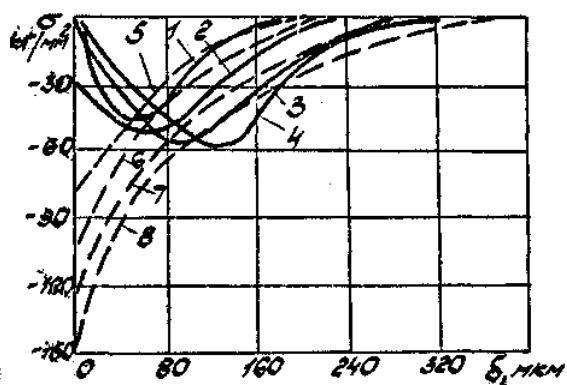


Рис. 14.

Аналогичные результаты получены Торбило В. М. и Маркусом Л. И. при обработке конструкционных и подшипниковых сталей. На рис.14 показаны эпюры тангенциальных σ_{τ} и осевых σ_0 остаточных напряжений в поверхностном слое закаленной стали 40X после выглаживания с различными усилиями инструментом сферической формы $R_c = 1$ мм (1 и 5 – $P = 50$ Н, 2 и 6- $P = 100$ Н; 3и7- $P = 150$ Н; 4и8 – $P = 200$ Н; 1, 2, 3, 4 –эпюры σ_{τ} ; 5 ,6 ,7 и 8 – эпюры σ_0). Глубина залегания сжимающих напряжений находится в интервале от 0,15 до 0,4 мм, а их величина колеблется от 500 до 1100 Н/мм².

Относительно наличия подповерхностного максимума тангенциальных сжимающих напряжений при ППД методом обкатки и выглаживания существуют различные мнения.

Часть исследователей считает, что наличие спада напряжений на поверхности связано с самой схемой деформации. По Кобрину М.М. – при контактной схеме деформации, когда максимум касательных напряжений находится на некоторой глубине, величина остаточных напряжений на поверхности должна уменьшаться. Переход к контактно-сдвиговой схеме пластической деформации, когда наряду с радиальной силой начинает действовать и сдвигающая, приводит к уменьшению глубины залегания максимальных остаточных напряжений и к уменьшению спада напряжений к поверхности.

В соответствии с данной точкой зрения подповерхностный максимум напряжений должен являться обязательным для любых режимов и параметров процесса. Однако, как показывает практика, такая форма эпюры напряжений характерна только для инструментов сферической формы с малыми значениями радиуса. Исследования, выполненные Чепой П.А. и Андрияшиным В.А., показали существенную зависимость характера эпюры остаточных напряжений от формы и размеров индентора. Если при выглаживании инструментами со сферической формой максимальные тангенциальные напряжения находятся на некоторой глубине, то при выглаживании инструментами цилиндрической формы наибольшие напряжения возникают на самой поверхности.

Папшев Д.Д. объясняет уменьшение сжимающих напряжений на поверхности нагревом тонкого поверхностного слоя в процессе деформирования. Эту точку зрения частично разделяют Торбило В.М., Маркус Л.И. Торбило В.М. отмечает, что хотя температура, возникающая в процессе выглаживания алмазными инструментами, сравнительно невелика, она может вызвать снижение величины сжимающих напряжений на поверхности, поскольку такое снижение усиливается с увеличением радиального усилия,

увеличивающего трение в контакте и выделение тепла.

Влияние теплового фактора на снижение сжимающих напряжений на поверхности подтверждается также исследованиями Маркуса Л.И., которые показали, что при выглаживании деталей из сталей с низкой теплопроводностью на их поверхности могут возникать даже растягивающие напряжения.

Вместе с тем спад к поверхности тангенциальных напряжений наблюдался при выглаживании сферическим индентором с режимами ($P = 30...50$ Н; $V = 3-10$ м/мин), когда нагрев очага деформации весьма незначителен. Вторая точка зрения не дает объяснения и тому факту, что не зависимо от формы эпюры тангенциальных напряжений, осевые напряжения имеют максимум на поверхности. Трудно объяснить также с этой точки зрения и то, что тангенциальные напряжения после выглаживания инструментом цилиндрической формы, даже при весьма напряженных условиях ППД, не имеют подповерхностного максимума; максимум тангенциальных напряжений сжатия в этих случаях возникает на поверхности изделия.

Снижение уровня остаточных сжимающих напряжений на поверхности упрочненных деталей – нежелательное явление. Оно приводит к ухудшению эксплуатационных свойств изделия.

Исследования, выполненные Кудрявцевым И.В., показали, что в связи со снижением эффекта наклепа, вызванным спадом сжимающих напряжений у самой поверхности, дополнительное повышение усталостной прочности может быть достигнуто за счет частичного удаления упрочненного слоя в подступичной части валов. Выигрыш в прочности от снятия упрочненного слоя со спадом сжимающих напряжений показан в таблице.

Наиболее целесообразно при аналитическом исследовании теплофизики отделочно-упрочняющей обработки использовать оптимальные варианты построения функций Грина с учетом конкретных размеров и формы взаимодействующих в процессе ППД тел, а затем суперпозицией канонических соотношений получить искомые решения краевых задач.

Таблица

Материал	Диаметр образца в мм	Глубина упрочненного слоя в мм	Глубина снятого обточкой слоя в мм	Предел выносливости в Н/мм ²
Титановый сплав	180	0	0	105
		6	0	145
		6	0,2	175
Сталь 45	14	0	0	115
		1	0	205
		1	0,2	215
		1	0,4	185
Сталь Ст.4	17,5	0	0	115
		1,5	0	235
		1,5	0,5	242
Сталь 45 (нормализованная)	17,5	0	0	127
		1,5	0	255
		1,5	0,5	262

Для процессов ППД местный источник теплоты хорошо описывается функцией (13), которая может быть представлена соотношением

$$q = q_m \exp \left[-k \frac{(x^1)^2 + (y^1)^2 + (z^1)^2}{R^2} \right]$$

В работах Л.И.Маркуса было показано, что с учетом такого мгновенного распределения интенсивности тепловыделения, температурное поле в неограниченном теле описывается соотношением

$$\theta(x, y, z) = \frac{Q}{c\rho(4\pi a)^{3/2} \left(t + \frac{R^2}{4aK} \right)^{3/2}} \exp \left[-\frac{x^2 + y^2 + z^2}{4a \left(t + \frac{R^2}{4aK} \right)} \right]$$

Сравнивая это решение с фундаментальным решением уравнения теплопроводности

$$\theta(x, y, z) = \frac{q}{c\rho(4\pi at)^{3/2}} \exp \left[-\frac{x^2 + y^2 + z^2}{4at} \right]$$

можно отметить их полную аналогично, из которой следует важный вывод: для момента времени $t = \frac{R^2}{4aK}$ фундаментальное решение дает такое распределение температур в неограниченном теле, как решение для обычного мгновенного источника в момент времени $t = 0$. Следовательно, на основании принципа суперпозиции решений такое же соответствие должно выполняться и для движущихся нормально-сферических источников.

Если в формуле для быстродвижущегося точечного источника к параметру t прибавить величину $\frac{R^2}{4aK}$, то получают соотношение для быстродвижущегося нормально-сферического источника.

Обсуждение результатов обзора

Тепловые явления в процессе ППД, оказывающие влияние на формирование характера остаточных напряжений в упрочненном слое и влияющие таким образом в известной мере на эксплуатационные свойства изделий, сказываются также и на производительности отделочно-упрочняющей обработки, поскольку скорость процесса может ограничиваться контактными температурами, а последние теплостойкостью и контактной прочностью материала инструмента.

Несмотря на большое влияние тепловых явлений на процесс ППД, их исследованию не уделялось еще должного внимания. Это можно объяснить известными трудностями, которые встают перед исследователями при попытке решить аналитически теплофизическую контактную задачу или определить температуру путем эксперимента в области контакта изделия с инструментом и в очаге деформации.

В связи с большими трудностями экспериментального измерения температуры при ППД, важное значение приобретают теоретические методы исследования температур и тепловых потоков в зоне обработки.

Выводы

Из рассмотрения исследований, относящихся к отделочно-упрочняющей обработке методами обкатки и выглаживания, можно сделать вывод о недостаточной изученности теплофизики процесса ППД. Несмотря на широкое распространение в практике и большие перспективы, открывающиеся при использовании для упрочнения сверхтвердых и алмазных инструментов, большинство работ посвящены изучению лишь отдельных сторон теплофизики процесса без учета взаимосвязи целого комплекса явлений, сопровождающих ППД.

Недостаточная изученность физики процесса, отсутствие исследований об особенностях возникновения тепла в очаге деформации и теплообмена в приконтактной зоне не позволяют в полной мере использовать возможности ППД вообще и отделочно-упрочняющую обработку алмазными инструментами в частности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барац Ф.Я. Повышение качества и эксплуатационных свойств круглых резцов путем отделочно-упрочняющей обработки рабочих поверхностей алмазным выглаживанием / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук Саратов. 2006. - 150 с.
2. Барац Ф.Я., Кочетков А.В. Охлаждение очага деформации при отделочно-упрочняющей обработке путем увеличения теплового потока в инструмент / Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 6.
3. Барац Ф.Я., Аржанухина С.П., Кочетков А.В. Обеспечение постоянства радиального усилия при отделочно-упрочняющей обработке / Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе Материалы 11-ой Всероссийской научно-практической конференции 27 марта 2013 г.- Новосибирск, НГТУ, 2013.
4. Барац Ф.Я., Кочетков А.В. Исследование остаточных напряжений при отделочно-упрочняющей обработке быстрорежущей стали // Технология машиностроения. ISSN 1562-322X. 2013, № 1.
5. Барац Ф.Я., Кочетков А.В. Режимы и качество обработки инструментов из быстрорежущих сталей методом ППД / Автомобильная промышленность. 2013. № 2.

Рецензент: Кокодеева Наталия Евсегнеевна, доктор технических наук, профессор, ученый секретарь Поволжского отделения Российской академии транспорта.