

УДК 621.787.4

DOI:10.30987/2223-4608-2020-2021-1-44-48

**А.Э. Вирт**, к.т.н.

(Камышинский технологический институт (филиал) ВолгГТУ,  
403874, Россия, Волгоградская обл., г. Камышин, ул. Ленина, д. 6 а)

E-mail: virt@kti.ru

## **Влияние силы деформирования при поверхностном пластическом деформировании на глубину упрочнения поверхностного слоя детали**

*Представлены результаты проведенных исследований влияния силы деформирования на глубину упрочнения поверхностного слоя детали. Изложена методика проводимых исследований, указано применяемое оборудование. Даны рекомендации по выбору режимов обработки поверхностным пластическим деформированием.*

**Ключевые слова:** поверхностное пластическое деформирование; упрочнение; деформирование роликами.

**A.E. Virt**, Can. Sc. Tech.

(Kamyshin Technological Institute (Branch) of VolgaSTU,  
6a, Lenin Str., Kamyshin, Volgograd Region, Russia, 403874)

## **Deformation force impact at surface plastic deformation upon strengthening depth of part surface layer**

*The results of investigations carried out on the impact of deformation force upon the depth of surface layer strengthening of a part are presented. There is presented a procedure of investigations carried out, the equipment used is shown. The recommendations for the choice of modes for processing with surface plastic deformation are given.*

**Keywords:** surface plastic deformation; strengthening; deformation with rollers.

В настоящее время общепризнанным является факт сильного влияния качества поверхностного слоя деталей на их работоспособность и долговечность. Существенного повышения качества поверхностного слоя деталей можно достичь, применяя упрочняющие методы обработки. Среди них широкое распространение в промышленности получили методы поверхностного пластического деформирования (ППД). В данной работе под этим широким понятием рассматривается обкатка роликом.

Технология ППД получила существенное развитие в период 1950 – 1980 г.г. В это время было разработано и внедрено большое количество технологий, инструментов, станков для

чистовой и упрочняющей обработки деталей в различных отраслях машиностроения. Поверхностное пластическое деформирование применяется для обработки деталей различной твердости, изготовленных из стали, чугуна, цветных металлов и сплавов, причём эти детали могут иметь размеры от нескольких миллиметров до нескольких метров.

Однако научные основы ППД и технологические методики назначения режимов упрочнения базировались главным образом на обобщении экспериментального материала или использовании упрощённых физических моделей. В связи с этим наметился существенный разрыв между теорией и практикой ППД, который проявился в недостаточном

понимании сущности явлений, происходящих в металле при ППД, отсутствии надежных методик расчёта параметров состояния поверхностного слоя и методов оптимизации режимов упрочнения, обеспечивающих заданные эксплуатационные свойства деталей.

В последнее время, в дополнение к накопленной теоретической и практической информации в этой области, производилось большое количество исследований для уточнения расчетных формул, введения в них поправочных коэффициентов. Проводились эксперименты, позволяющие понять физические процессы, проходящие в поверхностном слое. Таких исследований достаточно много. Но все они носят либо уточняющий характер, либо информационный. Единого описания процессов, происходящих в зоне обработки и единого математического аппарата, описывающего все эти процессы, до сих пор нет.

Большое количество работ в этой области за последние годы позволили получить описание протекающих процессов в зоне обработки при ППД с помощью современных САД-систем [1, 2].

При сегодняшнем применении этих данных и составленных на их основе рекомендаций технологической обработки деталей методом поверхностного пластического деформирования заметны большие расхождения получаемых результатов параметров поверхностного

слоя с рассчитанными и ожидаемыми заранее. Целью данной работы являлось выяснение причин такого расхождения, проверка экспериментальных данных и получение технологических рекомендаций назначения режимов обработки поверхностным пластическим деформированием.

Сила обкатывания является одним из самых важных технологических параметров и практически оказывает влияние на все технико-экономические показатели процесса, что обусловлено самим характером обработки методом поверхностного пластического деформирования в холодном состоянии. Путем изменения одной только силы обкатывания можно уверенно управлять всем процессом обработки.

Пластическая деформация сопровождается упрочнением металла, величина которого определяется измерением микротвёрдости поверхностного слоя материала. Микротвёрдость характеризует сопротивление металла пластическим деформациям и показывает значительную взаимосвязь со стандартными механическими характеристиками металла.

С использованием методов косого среза или послойного травления поверхностного слоя определяют распределением в нем микротвёрдости. Результаты измерения приведены на рис. 1 [4].

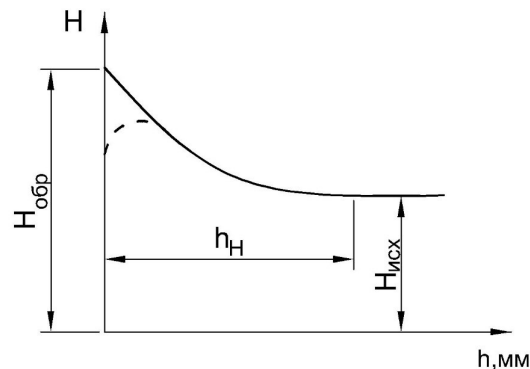


Рис. 1. Эпюра распределения микротвёрдости после ППД

В работе [4] приведена зависимость распределения глубины упрочнения (см. рис. 1), но не указываются конкретные величины или уточнения о возможности применять эту зависимость для различных марок сталей при различных режимах обработки.

Автор предлагает при прогнозировании

глубины упрочнения по графику устанавливать толщину упрочненного слоя  $h_H$ , а степень деформационного упрочнения  $\delta_H$  вычислять по формуле

$$\delta_H = \frac{(H_{\text{обр}} - H_{\text{исх}})}{H_{\text{исх}}}, \quad (1)$$

где  $H_{обр}$  и  $H_{исх}$  – твердость после и до обработки соответственно.

В работе [3] утверждается, что глубина наклепа зависит от размера контактной площади. С увеличением давления глубина наклепа увеличивается. Глубину наклепа можно регулировать изменением размера деформационного инструмента. К примеру, уменьшение диаметра шара приводит к уменьшению глубины наклепа. Эти закономерности известны, но их численные взаимосвязи носят до сих пор примерный характер. И точно не позволяют рассчитать величину и глубину упрочнения поверхности при ППД.

Приведем расчетные зависимости для определения глубины упрочнения поверхности детали.

Определение глубины упрочненного слоя:

$$H_n = \sqrt{\frac{P_y}{2 \cdot \sigma_T}}, \quad (2)$$

где  $P_y$  – радиальная сила, приложенная к поверхности детали роликом обкатника, Н;  $\sigma_T$  – предел текучести стали заготовки.

Формула определения глубины упрочнения (2), полученная Хейфецем С.Г., в экспериментальной проверке для больших радиусов деформирующих роликов и деталей оказалась неточна. Многими авторами были приняты попытки скорректировать и уточнить данную зависимость. Например, формула Ярославцева В.М. (3) в которой введена поправка на геометрические параметры инструмента и детали при обработке:

$$H_n = \sqrt{\frac{P_y}{2 \cdot \sigma_T \cdot m^2}}, \quad (3)$$

где  $m$  – поправочный коэффициент, рассчитываемый по формуле

$$m = 1 + 0,07 \cdot \left( \frac{1}{\frac{1}{R_{пр}} + \frac{2}{D_r} + \frac{1}{R_d} - \frac{1}{R}} \right), \quad (4)$$

где  $R_{пр}$  – профильный радиус (4 мм);  $R_d$  – радиус упрочняемой поверхности;  $D_r$  – диаметр ролика;  $R$  – радиус профиля детали в поперечном сечении (для цилиндрических он стремится к бесконечности).

Кудрявцев И.В., получив экспериментальную поправку  $\omega$ , так же уточнил данную формулу с учетом влияния размеров роликов и детали:

$$H_n = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{P_{yn}}{2 \cdot \sigma_T}} \quad (5)$$

где  $\omega = 1 + 0,07 \cdot R_{пр}$ . (6)

Также были получены следующие расчетные зависимости для определения глубины упрочнения:

$$h_n = 2,8 \sqrt{D_{пр} h}; \quad D_{пр} = \frac{1}{A} \sqrt{\left(\frac{0,338}{a}\right)^3}, \quad (7)$$

$$h = \frac{P_{yn}}{H \pi D}, \quad (8)$$

$$h_n \geq \frac{23,6 \sigma_T \rho}{E}; \quad \rho = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}, \quad (9)$$

$$h_n = K \sqrt{S_K}, \quad [2] \quad (10)$$

$$h_n = 2,87 \frac{q}{H} - 0,01 R_p, \quad (11)$$

где  $h_n$  – глубина упрочнения;  $\sigma_T$  – предел текучести обрабатываемого материала;  $K$  – коэффициент, зависящий от размеров и материала детали;  $R_{пр}$ ,  $\rho$  – приведенные радиусы кривизны в месте контакта;  $E$  – модуль упругости;  $A$  – коэффициент, учитывающий кривизну контактирующих тел;  $H$  – пластическая твердость или контактный модуль упрочнения образца;  $P_{yn}$  – сила деформирования;  $S_K$  – площадь контакта;  $R_1$ ,  $R_2$  – радиусы сопряжения;  $D_{пр}$  – приведенный диаметр;  $R_p$  – радиус ролика;  $q$  – удельное давление.

Браславский В.М., исследуя рассматриваемые вопросы, установил, что глубина распространения пластической деформации под отпечатком зависит также от его формы:

$$\frac{P}{ab \sigma_T} = F\left(\frac{h_n}{b}\right), \quad (12)$$

где  $a$ ,  $b$  – полуоси проекции эллиптической вмятины на плоскость.

Большое количество исследований и разнообразия расчетных зависимостей вызваны несовпадением или большим процентом погрешности при проверке их экспериментальным путем. Данный факт также получил подтверждение на одном из предприятий ООО «Камышинский крановый завод». При попыт-

ке рассчитать и спрогнозировать глубину упрочнения по известным методикам при заданных режимах обработки запланированные результаты не достигались.

Для подтверждения этих зависимостей и возможности их использования для прогнозирования результатов при обработке, необходимо произвести экспериментальные исследования обработки детали при различных усилиях деформирования. Далее обработать полученные результаты, сделать вывод о возможности или невозможности применения данных формул.

Оценка глубины упрочнения по микроструктуре поверхностного слоя осуществлена проф. Зайдесом С.А., Рудых Н.В. [5]. В данной работе описан созданный программный комплекс, который автоматически определяет глубину упрочнённого слоя по фотографии микрошлифа.

Автором данной работы производилась обработка заготовок обкатником с одним деформирующим роликом диаметром 45 мм с радиусом профиля 4 мм. На электронном микроскопе Olympus VX61, по микрошлифам, визуально определялась наибольшая глубина изменения в поверхностном слое заготовки (рис. 2).

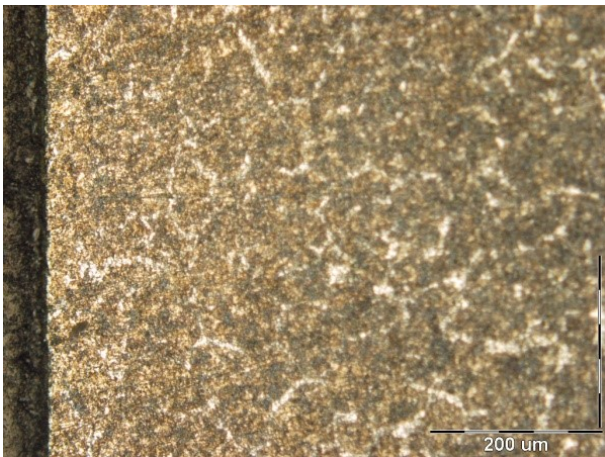


Рис. 2. Фотография микрошлифа поверхностного слоя после обработки ППД

Анализируя снимок, видно, что сталь состоит из ферритных (белых) и перлитных (темных) зерен. На снимках видны дробление и деформация зерен, благодаря чему можно наглядно определить глубину упрочненного слоя. Произведя обработку на различных подачах и при различной силе деформирования, можно визуально определить глубину упрочнения по изменению структуры в поверхностном слое.

Зона перехода структуры из одного вида в другой слабо выражена и определить четкую границу невозможно, что косвенно подтверждается и графиком (см. рис. 1). Закономерно возникает вопрос о том, какую величину глубины упрочнения можно определить по формулам (1) – (12), если четкой границы её окончания нет.

Для представления расхождения расчетной величины глубины упрочнения с величиной глубины деформированной структуры, которую можно заметить по микрошлифу, построена графическая зависимость (рис. 3).

Проверка экспериментальными исследованиями показала, что изменения, происходящие в поверхностном слое заготовки при ее обработке ППД, не соответствуют значениям получаемым теоретическим (расчётным) способом. Объяснением этого может быть то, что в большинстве формул не учитываются многие физико-механические свойства материалов. Например, твердость, остаточные напряжения, изначальное фазовое состояние заготовки и т.д. Данный вопрос требует дальнейшего изучения, возможно внесение в приведенные зависимости дополнительных поправочных коэффициентов или введение понятия степени упрочнения на определенной глубине.

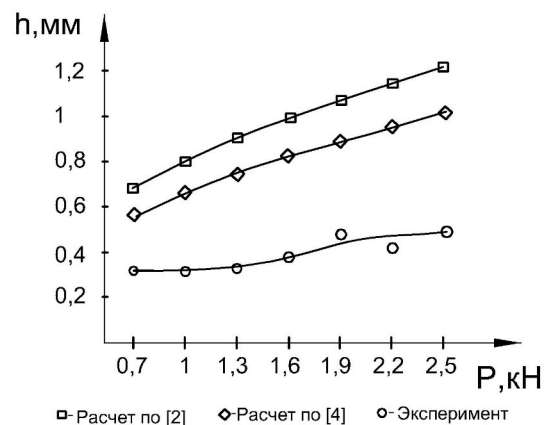


Рис. 3. Сравнение экспериментального определения глубины упрочнения с теоретическим [2], [4]

Использование рассмотренных формул для предварительного определения глубины упрочнения при технологическом прогнозировании результатов обработки желательно с применением экспериментальных исследований.

Результаты исследований, изложенные в данной работе, показали, что определять глубину упрочнения по изменению структуры поверхностного слоя не достаточно. Необходи-

можно найти простую и более точную методику определения данного параметра. Это позволит в условиях промышленного производства заранее прогнозировать получение необходимых параметров поверхностного слоя.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Блюменштейн, В.Ю., Митрофанова, К.С.** Уточненная конечно-элементная модель процесса отделочно-упрочняющей обработки сложнопрофильным инструментом. // *Инновации в технологиях и образовании. Сб. ст. участников XIII Международной научно-практической конференции.* Белово: – 2020. – С. 214-219.
2. **Зайдес, С.А., Колесник, А.В.** Оценка напряженно-деформированного состояния при упрочнении цилиндрических деталей роликом с асимметричным профилем // *Научные технологии в машиностроении.* – 2019. – №9 (99). – С. 18-25.
3. **Папшев, Д.Д.** Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, – 1978. – 152 с.
4. **Смелянский, В.М.** Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, – 2002. – 299 с.

5. **Зайдес, С.А., Рудых, Н.В.** Разработка программного комплекса для расчета деформированного состояния изделий микроструктурным методом // *Упрочняющие технологии и покрытия.* – 2010. – № 5. – С. 43-45.

## REFERENCES

1. Blumenstein, V.Yu., Mitrofanova, K.S. Refined finite-element model of finish-strengthening with complex profile tool. // *Innovations in Technologies and Education. Proceedings of the XIII-th Inter. Scientific-Pract. Conf. Belovo:* - 2020. – pp. 214-219.
2. Zaides, S.A., Kolesnik, A.V. Assessment of stress-strain state at cylindrical parts strengthening by roller with asymmetric profile // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering.* – 2019. – No. 9(99). – pp. 18-25.
3. Papshev, D.D. *Finish-strengthening with Surface Plastic Deformation.* – M.: Mechanical Engineering, - 1978. – pp. 152.
4. Smelyansky, V.M. *Mechanics of Parts Strengthening with Surface Plastic Deformation.* – M.: Mechanical Engineering, - 2002. – pp. 299.
5. Zaides, S.A., Rudykh, N.V. Software complex development for product strain state calculation with micro-structural method // *Strengthening Technologies and Coatings.* – 2010. – No.5. – pp. 43-45.

Рецензент д.т.н.  
Пётр Юрьевич Бочкарев



Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Брянский государственный технический университет"

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7  
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала (4832) 51-51-38, 8-903-592-87-39. E-mail: naukatm@yandex.ru

Вёрстка А.А. Алисов. Технический редактор А.А. Алисов.

Сдано в набор 15.01.2021. Выход в свет 30.01.2021.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,58.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии  
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования  
"Брянский государственный технический университет"  
241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

12+