

УДК 621.9.02

**С.А. Клименко, д.т.н., проф.****А.С. Манохин, к.т.н., м.н.с.***Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля  
НАН Украины*

## **АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЛУБИНЫ УПРОЧНЕННОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ИЗДЕЛИЯ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА ПРИ МИКРОТОЧЕНИИ**

*В настоящей работе предпринята попытка аналитического исследования глубины упрочненного поверхностного слоя, формируемого на изделии из алюминиевого сплава АЛ8 при обработке алмазным микроточением.*

**Введение.** В результате механической обработки деталей неизбежно изменяется физико-механическое состояние их поверхностных слоев – формируются остаточные напряжения различного знака, материал поверхностного слоя наклепывается [1]. Такое изменение во многом обуславливает эксплуатационные возможности изделий, деформацию их поверхностей в процессе работы. При изготовлении поверхностей высокой точности, особенно применительно к изделиям оптического назначения и электронной техники, процесс механической обработки должен обеспечивать минимально возможную величину слоя изделия с измененными свойствами.

Финишные операции механической обработки сопровождаются сравнительно малыми пластическими деформациями, однако, учитывая требования, предъявляемые к обрабатываемым деталям, оценка их физико-механического состояния является важной научной и прикладной задачей.

Традиционно глубина упрочненного поверхностного слоя определяется на косых шлифах, что применительно к изделиям, обработанным алмазным микроточением, обуславливает значительные сложности при изготовлении шлифов в связи с малой величиной деформированного слоя.

В настоящей работе предпринята попытка аналитического исследования глубины упрочненного поверхностного слоя, формируемого на изделии из алюминиевого сплава АЛ8 при обработке алмазным микроточением.

**Основная часть.** Режущие кромки инструментов для микроточения могут быть выполнены в виде части окружности большого радиуса (радиусные резцы) или в виде прямой ломаной

линии (фасеточные резцы) [2]. В таких условиях, учитывая относительно слабое взаимовлияние главной и вспомогательной режущих кромок инструмента в процессе резания, для описания процесса обработки может быть использована плоская схема свободного резания, а силы резания заменены равнодействующей, приложенной к вершине инструмента.

Применительно к свободному резанию, в работах [3, 4] на основе решения задачи теории упругости о приложении сосредоточенной силы к точке полубесконечной пластины единичной толщины предложена схема упрочнения поверхностного слоя изделия под действием силового фактора (рис. 1).

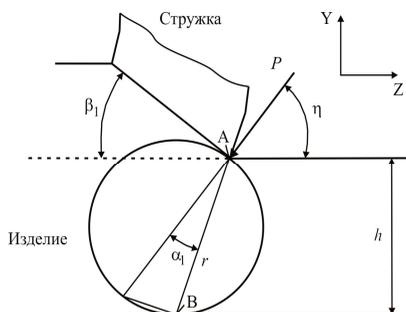


Рис. 1. Схема формирования упрочненной зоны в процессе обработки резанием:  $P, \eta, A$  – равнодействующая сила резания, угол ее наклона в плоскости  $Y-Z$ , точка приложения силы соответственно;  $\beta_1$  – угол сдвига;  $\alpha_1$  – угол между полярной осью, совпадающей с направлением равнодействующей силы резания и радиусом-вектором  $r$ , проведенным к исследуемой точке  $B$ ;  $h$  – глубина упрочненного поверхностного слоя

В соответствии с представленной схемой, под действием равнодействующей силы  $P$  в любой точке рассматриваемой системы возникают напряжения, определяемые по зависимости:

$$\sigma_r = \frac{4P \cos \beta}{br[2(\pi + \nu_1) - \sin 2\alpha + \sin 2(\alpha + \nu_1)]},$$

где  $r$  – расстояние от точки приложения силы до исследуемой точки;  $\operatorname{tg} \eta = P_y/P_z$ , где  $P_y, P_z$  – технологические составляющие силы резания;  $b$  – ширина среза.

Окружность, представленная на рис. 1, является окружностью равных напряжений. В частном случае  $\sigma_r = R_{0,2}$ , где  $R_{0,2}$  – предел

текучести обрабатываемого материала. За областью с  $\sigma_r = R_{0,2}$  имеют место упругие деформации, а внутри – пластические деформации. Таким образом, глубина упрочненного поверхностного слоя  $h$  определяется по зависимости:

$$h = \frac{2P(1 + \sin \alpha)}{bR_{0,2} [2(\pi + \nu_1) - \sin 2\alpha + \sin 2(\alpha + \nu_1)]}$$

С учетом особенностей процесса микроточения, для расчета сил резания ( $P, P_{xy}, P_{zn}, P_{yn}$  – силы, действующие на передней поверхности инструмента [2];  $P_3, F_3$  – силы, действующие на задней поверхности инструмента [5]) предложены зависимости:

$$P = \frac{\tau_p a_1 b_1}{\sin \nu_1 \cdot \cos(\alpha + \nu_1)};$$

$$P_{zn} = P \cos(\eta);$$

$$P_{xy} = P \sin(\eta);$$

$$P_{yn} = P_{xy} \cos \psi;$$

$$P_3 = HB \cdot b \left\{ 0,34c + h_3 + 1,65 \frac{H_{упр}}{\sin \delta} (1 - \nu^2)^2 \left( \frac{HB}{E} \right)^2 \right\};$$

$$F_3 = HB \cdot b \left\{ [0,34c + h_3] \mu_{пл} + 1,65 \frac{H_{упр}}{\sin \delta} (1 - \nu^2)^2 \left( \frac{HB}{E} \right)^2 \mu_{упр} \right\},$$

где  $a_1, b_1$  – толщина и ширина среза соответственно ( $a_1 \cdot b_1 = A_i$  – площадь сечения среза);  $\rho$  – радиус округления режущей кромки резца;  $h_3$  – ширина фаски износа инструмента по задней поверхности;  $\alpha, \varphi, \varphi_1$  – задний угол, главный и вспомогательный углы в плане инструмента соответственно;  $\psi$  – угол схода стружки;  $H_{упр}$  – упругое восстановление материала изделия со стороны задней поверхности инструмента;  $\nu, HB, E$  – коэффициент Пуассона, твердость и модуль упругости обрабатываемого материала соответственно;  $\mu_{пл}, \mu_{упр}$  – коэффициенты трения на участках пластического и упругого контакта со стороны задней поверхности инструмента соответственно.

Длина контакта на передней поверхности резца  $l_n$  определяется выражением [6]:

$$l_n = \frac{0,48}{\sqrt[4]{m \cdot (n + 1)}} \cdot \sqrt[4]{\chi \cdot E_1 \cdot k^3 \cdot a_1^3 \cdot b_1},$$

где  $\chi = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{\nu_2^2}{E_2}$ ;  $E_1, E_2, \nu_1, \nu_2$  – модули упругости и коэффициенты

Пуассона материала стружки и реза соответственно;  $k$  – усадка стружки;  $m$  – константа, которая при выборе закона распределения нормальных напряжений в виде  $\sigma(y) = \sigma_0 \left(1 - \frac{y}{l_n}\right)^n$ , определяется по [6, 7]:

$$m = \frac{1}{(n+1) \cdot (n+2) \cdot (n+3) \cdot (n+4)} \cdot \left\{ \frac{1}{3} \cdot n \cdot (n+4) - \left(\frac{n+1}{n+2}\right)^{n+4} - \frac{(n+1)^2 \cdot (n+4)}{6 \cdot (n+2)^3} \cdot (2n^2 + 8n + 9) + 1 \right\}.$$

Принимая коэффициенты трения на участках пластического и упругого контакта инструмента из монокристалла природного алмаза с алюминиевым сплавом  $\sim 0,07$  [8], получаем  $F_3 = 0,07P_3$ .

Площадь сечения среза при обработке радиусным резцом определяется зависимостью [9]:

$$A_i = \int_0^S \left( \sqrt{r^2 - \left(x - \sqrt{2rt_i - t_i^2}\right)^2} + t_i - r \right) dx + \int_S^{\sqrt{2rt_i - t_i^2} + \frac{S}{2}} \left( \sqrt{r^2 - \left(x - \sqrt{2rt_i - t_i^2}\right)^2} - \sqrt{r^2 - \left(x - \sqrt{2rt_i - t_i^2} - S\right)^2} \right) dx.$$

Учитывая зависимости для определения усадки стружки при микроточении, приведенные в [2], последняя численным методом определяется из выражения:

$$f(k) = \sqrt{1 + \left\{ \cos \gamma \left[ \frac{0,48C_1 \tau_0 k^{3/4}}{\tau_p^4 \sqrt{m(n+1)}} \right] \right\}^4 \sqrt{\chi E_1 \frac{b_1}{a_1}} - k},$$

где  $C_1 = 0,687$  [6];  $\tau(y) = \tau_0 \cdot f(y/l_n)$ .

Полученное значение усадки стружки позволяет рассчитать величину угла сдвига.

Принимаем по Н. Н. Зореву  $\tau_p = 0,6R_m \frac{(1+\delta)}{1-0,7\delta}$  и по Стаблеру  $\eta = \pi/4 - \gamma/2 - \beta_1$ , где  $R_m$ ,  $\delta$  – предел прочности при сжатии и относительное удлинение обрабатываемого материала соответственно. Для угла схода стружки в [2] предложена зависимость:

$$\psi = \operatorname{arctg} \frac{\left[ \begin{aligned} & \operatorname{arcsin} \left( \frac{\sqrt{2Rt - t^2}}{R} \right) \sin \left( 0,5 \operatorname{arcsin} \left( \frac{\sqrt{2Rt - t^2}}{R} \right) \right) - \\ & - \operatorname{arcsin} \left( \frac{S}{2R} \right) \sin \left( 0,5 \operatorname{arcsin} \left( \frac{S}{2R} \right) \right) \end{aligned} \right]}{\left[ \begin{aligned} & \cos \left( 0,5 \operatorname{arcsin} \left( \frac{\sqrt{2Rt - t^2}}{R} \right) \right) \operatorname{arcsin} \left( \frac{\sqrt{2Rt - t^2}}{R} \right) + \\ & + \operatorname{arcsin} \left( \frac{S}{2R} \right) \cos \left( 0,5 \operatorname{arcsin} \left( \frac{S}{2R} \right) \right) \end{aligned} \right]} .$$

Окончательно зависимости для расчета сил резания получаем из выражений (4)–(8) в виде:

$$P_z = P_{zn} + F_3 ,$$

$$P_y = P_{yn} + P_3 ,$$

$$P = \sqrt{P_z^2 + P_y^2} .$$

Учитывая, что аналитическое определение величины упругого восстановления достаточно сложно, она может быть определена экспериментально методом непрерывного вдавливания индентора по [5].

В процессе исследования в поверхность образцов из алюминиевого сплава внедрялся алмазный индентор. В координатах "сила  $P_n$ -глубина вдавливания  $H$ " записывалась диаграмма вдавливания индентора в поверхность и определялась величина  $X$ , соответствующая упругому восстановлению материала образца при снятии нагрузки.

На рис. 2 представлена диаграмма вдавливания индентора в образец из алюминиевого сплава АЛ8, обработанный микроточением резцом из природного алмаза.

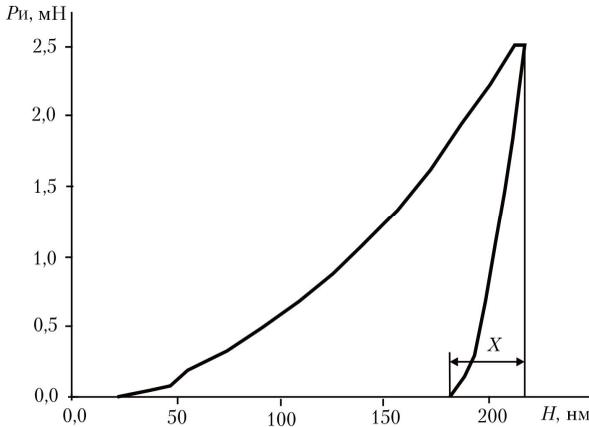


Рис. 2. Определение величины упругого восстановления материала образца после снятия нагрузки по диаграмме «сила  $P_n$  – глубина вдавливания  $H$ » для образца из алюминиевого сплава АЛ8

Величина  $X = H_{упр}$  составляет 20% от общей глубины внедрения индентора в образец.

Учитывая данные работы [10], толщина слоя обрабатываемого материала  $a$ , подминаемого под заднюю поверхность инструмента, определяется выражением:

$$a = \rho(1 - \sin \gamma_k) = 0,19\rho,$$

где  $\gamma_k = 53-55^\circ$  [11]. Принимаем  $\gamma_k = 54^\circ$ .

Приравнивая глубину внедрения индентора и толщину слоя обрабатываемого материала, подминаемого под заднюю поверхность инструмента, можно определить величину  $H_{упр}$  для исследуемого обрабатываемого материала в зависимости от радиуса округления режущей кромки инструмента.

В табл. 1 представлены исходные данные для расчета глубины упрочненного поверхностного слоя изделия из алюминиевого сплава АЛ8.

Таблица

Исходные данные для расчетов

Материал	$E$ , ГПа	$\nu$	НВ, МПа	Предел прочности, МПа		$\delta$ , %	$\mu$
АЛ8	75	0,32	80	350 ( $R_{bm}$ )	170	10	0,07

[12]					(R <sub>0,2</sub> )		
алмаз	1140	0,07	–	–	–	–	–

На рис. 3 приведенные результаты расчетов глубины упрочненного поверхностного слоя в зависимости от режимов резания, величин износа по задней поверхности и радиуса округления режущей кромки инструмента.

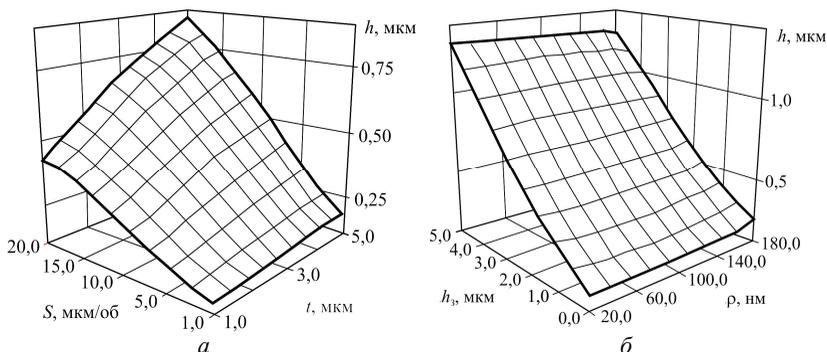


Рис. 3. Влияние глубины резания и подачи (а), износа по задней поверхности и радиуса округления режущей кромки инструмента (б) на глубину упрочненного слоя при микроточении сплава АЛ8

**Выводы.** Как видно из полученных результатов, глубина упрочненного слоя при микроточении зависит от параметров, обуславливающих силовое нагружение – глубины резания, подачи, износа по задней поверхности и радиуса округления режущей кромки инструмента. При этом, влияние глубины резания более значимо при больших величинах подачи. Аналогично и для подачи – ее влияние возрастает с увеличением глубины резания. В целом, изменение глубины упрочненного слоя на единицу изменения параметра, имеет большее значение для глубины резания, что, вероятно, связано с большим влиянием последней на силы резания. При сочетании наибольших значений глубины резания и подачи (в рассматриваемом диапазоне значений) глубина упрочненного слоя на образце из алюминиевого сплава АЛ8 составляет 0,87 мкм.

Расчеты показывают, что износ инструмента по задней поверхности оказывает существенно большее влияние на глубину упрочненного слоя, чем радиус округления режущей кромки инструмента. Вероятно, это обусловлено тем, что фаска износа формирует значительно большую часть участка контакта по задней

поверхности инструмента, в сравнении с зоной упругого восстановления обрабатываемого материала. Как показано выше, для алюминиевого сплава АЛ8  $H_{\text{упр}} = 0,2 \cdot 0,19\rho = 0,038\rho$ . В случае обработки резцом с радиусом округления 160 нм, эта величина составляет 6,1 нм, а связанная с ней зона упругого контакта на задней поверхности резца с задним углом  $\alpha = 10^\circ - 35,8$  нм. В более ранних наших работах показано, что зеркальная поверхность характеризуется шероховатостью  $Rz < 40$  нм, чему соответствует износ инструмента по задней поверхности  $\leq 2$  мкм. Указанная величина более чем в 50 раз превышает величину зоны контакта на задней поверхности инструмента, связанной с упругим восстановлением обрабатываемого материала.

В сравнении с глубиной резания и подачей, износ инструмента по задней поверхности оказывает большее влияние на глубину упрочненного поверхностного слоя, что говорит о значимости деформационных явлений, имеющих место со стороны задней поверхности инструмента. Для предельной по допустимой шероховатости обработанной поверхности величине  $h_z$  глубина упрочненного поверхностного слоя составляет 0,56 мкм.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Технологические основы управления качеством машин / А.С. Васильев, А.М. Дальский, С.А. Клименко и др. – М.: Машиностроение, 2003. – 256 с.
2. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: В 6-ти т. / Под общей ред. Н.В. Новикова. – Т. 4: Инструменты и технологические процессы в прецизионной финишной обработке / Под ред. В.В. Рогова. – Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2006. – 260 с.
3. *Куницын В.Н., Кравченко И.Б.* Определение глубины упрочнения поверхностного слоя детали при механической обработке // Обработка высокопрочных сталей и сплавов инструментами из сверхтвердых синтетических материалов: Сб. науч. тр. – Куйбышев, КуПИ, 1978. – С. 65–68.
4. Jasinevicius Renato G., Duduch Jaime G., Porto Arthur J. V. Investigation on Diamond Turning of Silicon Crystal - Generation Mechanism of Surface Cut with Worn Tool // J. Braz. Soc. Mech. Sci. – 2001. – vol. 23, № 2. – P.
5. *Клименко С.А.* Силы резания на задней поверхности инструмента и точность изделий, обработанных

- микрооточением // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: Зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2009. – Вип. 24. – С. 47–51.
6. *Старков В.К.* Дислокационные представления о резании металлов. – М.: Машиностроение, 1979. – 160 с.
  7. *Добровольский Г.Г., Жоголев Д.А.* Расчет угла сдвига и усадки стружки при алмазном микрооточении // Сверхтв. мат. – 1985. – № 5. – С. 44–49.
  8. Лезвийный инструмент из сверхтвердых материалов: Справ. / Под ред. Н.В. Новикова. – К.: Техника, 1988. – 118 с.
  9. *Мановицкий А.С.* Расчет площади контакта острого резца круглой формы с припуском при профилемном точении // Резание и инструмент в технологических системах: Международ. науч.-техн. сб.– Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. – Вып. 70. – С. 292–297.
  10. Научные основы прогрессивной техники и технологии / В.А. Авдудевский, А.Ю. Ишлинский, И.Ф. Образцов и др. – М.: Машиностроение, 1985. – 376 с.
  11. *Виноградов А.А.* К вопросу определения сил на задней поверхности инструмента // Сверхтв. мат. – 1988. – № 1. – С. 46–51.
  12. [http://window.edu.ru/window\\_catalog/pdf2txt?p\\_id=5817&p\\_page=4](http://window.edu.ru/window_catalog/pdf2txt?p_id=5817&p_page=4)

КЛИМЕНКО Сергей Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины.

Научные интересы:

- обработка материалов резанием;
- режущие инструменты.

МАНОХИН Андрей Сергеевич – кандидат технических наук, младший научный сотрудник Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины

Научные интересы:

- обработка материалов резанием;
- режущие инструменты.

Подано 10.09.2009