

# Исследование процессов обработки

УДК 621.924.93

**А. Ф. Саленко<sup>1</sup>, В. Т. Щетинин<sup>1</sup>, Г. В. Габузян<sup>1</sup>,  
В. А. Никитин<sup>1</sup>, Н. В. Новиков<sup>2</sup>, С. А. Клименко<sup>2,\*</sup>**

<sup>1</sup>Кременчугский национальный университет

им. Михаила Остроградского, г. Кременчуг, Украина

<sup>2</sup>Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля

НАН Украины, г. Киев, Украина

\*atmu@meta.ua

## **Разрезание заготовок из поликристаллических сверхтвердых материалов струйными методами**

*Изучена интенсивность разрезания заготовок из твердого сплава, поликристаллического сверхтвердого материала на основе кубического нитрида бора, а также алмазно-твердосплавной пластины с использованием гидроструйной, лазерной, лазерной с охлаждением жидкостью и лазерно-струйной технологий. Проанализированы особенности разрезания двухслойных композиций, включающих слой поликристаллического алмаза на основе из твердого сплава. Показана эффективность гибридного процесса обработки, сочетающей лазерно-струйную и гидроструйную технологии, который позволяет продуктивно выполнять разрезание заготовок требуемого профиля.*

**Ключевые слова:** струйная обработка, гибридная резка, твердый сплав, ПСТМ, алмазно-твердосплавная пластина.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Размерная обработка изделий из твердых сплавов и сверхтвердых материалов, в частности контурное разрезание заготовок произвольной формы, представляет несомненный интерес для современного высокотехнологичного производства, поскольку позволяет формировать из полученных спеканием заготовок полуфабрикаты или готовые изделия с различными геометрическими формами.

При этом традиционные методы, прежде всего, абразивная обработка, электроэрозионное разрезание, имеют ограниченное применение, что обусловлено особенностями структурного состояния и физико-механическими свойствами материалов обрабатываемых заготовок. Особенно сложной является обработка изделий из слоистых композиций, в которых имеется опас-

ность разрыва адгезионных связей между слоями. К заготовкам таких изделий относятся алмазно-твердосплавные пластины (АТП), содержащие верхний (рабочий) слой из поликристаллического сверхтвердого композита на основе синтетического алмаза (ПКА) и нижний (опорный) слой из твердого сплава (ТС), полученные спеканием в аппаратах высокого давления [1].

В [2, 3] было показано, что струйные методы обработки (гидроабразивный и лазерно-струйный) имеют широкие перспективы в промышленном использовании при разрезании плоских заготовок из поликристаллических сверхтвердых материалов (ПСТМ) на основе кубического нитрида бора (ПКНБ) и ТС, поскольку позволяют формировать поверхности реза с удовлетворительной производительностью. Однако вопросы обеспечения качества обработанных поверхностей изделий остаются в полном объеме еще нерешенными. Так, проблемой разрезания заготовок из ПКНБ и ТС является обеспечение стабильных низких показателей шероховатости поверхности, а также минимального отклонения формы готовых изделий.

Целью работы является анализ и выбор условий рационального разрезания плоских заготовок из ПСТМ–ПКНБ и АТП.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Разрезаемые АТП представляли собой двухслойные композиции с верхним ПКА-слоем толщиной до 1,0 мм и твердосплавной основой толщиной до 3,0 мм. Размер пластин – 12,7×12,7 мм.

Резы в заготовках из ПКНБ “борсинит” и АТП, а также твердого сплава Т5К10, выполняли методами гидроструйной (ГАР), лазерной (ЛР), лазерной с охлаждением жидкостью (ЛРО) и лазерно-струйной резки (ЛРС).

Эксперименты выполняли с использованием лазерно-струйного комплекса ЛСК-400-5, оснащенного гидроабразивной головкой с водяным соплом  $d_c = 0,22$  мм и калибровочной трубкой  $D_k = 1,05$  мм.

ГАР производили с расходом абразива до 0,5 кг/мин и под давлением жидкости 250 МПа. В качестве абразива использовали гранатовый песок зернистостью 300 меш.

При многопроходной лазерно-струйной обработке резы осуществляли с подачей головки до 50 мм/мин. Использовали импульсный Nd:YAG-лазер мощностью 400 Вт с частотой следования импульсов 75–150 Гц. Для реализации гибридного процесса установку оснащали специальной лазерно-струйной головкой, позволяющей без нарушения положения основных инструментальных осей осуществлять обработку с использованием кольцевого лазерного сопла и смесительной камеры для реализации гидроабразивного резания. Фокусировку луча выполняли по методике, обеспечивающей центровку и попадание всех его мод на фокусирующие линзы тубуса. Продувку элементов оптики выполняли очищенным сжатым воздухом через сопло диаметром 2,8 мм под избыточным давлением 0,05 МПа. Подачу жидкости при ЛРС производили непосредственно в центр фокуса лазера под давлением 25–50 МПа.

### АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ

Анализ процессов струйной обработки показывает, что применяемый инструмент – струя жидкости или лазерно-струйный поток – не является жестким формообразующим средством, способным однозначно формировать поверхности изделия.

В то же время, при гидроабразивном воздействии поверхность преграды, в качестве которой выступает обрабатываемая поверхность, воспринимает

симметричную нагрузку только в первоначальный момент обработки. И таким образом, силовое воздействие в системе заготовка–нежесткий струйный инструмент, не являясь симметричным при образовании сквозных разрезов или не полностью прорезанных каналов, также будет способствовать образованию поверхностей с пространственными отклонениями формы.

Поскольку прочность материала абразивных частиц как минимум в 1,5–2,0 раза меньше по сравнению с прочностью обрабатываемого материала, при ударе частицы о преграду (в данном случае об обрабатываемую поверхность) происходит полидеформационное повреждение поверхности и разрушение самой частицы. Отмеченное отвечает условиям натекания гидроабразивной струи под углами, близкими к нормальному (рис. 1, *a*) (т. е. в случае, когда сквозного разрезания нет и частицы бомбардируют поверхность, вызывая отдельные микродеформации и активизируя зарождение и развитие начальных микродефектов на обрабатываемой поверхности). Интенсивное разрушение материала, зарождение и развитие лунки гидрорезания возможно путем микрорезания, однако в этом случае дефекты поверхности, обусловленные начальным упругим деформированием в точке удара частицы, возможны только при изменении вектора движения частицы, скорость движения частицы, как и запас ее кинетической энергии, в этом случае значительно уменьшается. Объемное напряженное состояние материала в зоне натекания струи определяется уравнениями [4]

$$\begin{aligned}\sigma_r &= 2G \left( \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\mu \varepsilon}{1-2\mu} \right); & \sigma_t &= 2G \left( \frac{U}{r} + \frac{\mu \varepsilon}{1-2\mu} \right); \\ \sigma_z &= 2G \left( \frac{\partial H}{\partial z} + \frac{\mu \varepsilon}{1-2\mu} \right); & \tau &= G \left( \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial H}{\partial z} \right),\end{aligned}$$

причем объемная деформация в месте натекания струйного потока определяется как  $\varepsilon = \frac{1}{3}(\varepsilon_r + \varepsilon_t + \varepsilon_z) = \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{U}{r} + \frac{\partial H}{\partial z}$ . Исходя из условий равновесия напряжений, действующих на гранях элемента, и с учетом выше приведенных соотношений дифференциальные уравнения для  $U$  и  $H$  примут вид

$$\begin{cases} (1-2\mu) \left[ \Delta U - \frac{U}{r^2} \right] + \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} = 0; \\ (1-2\mu) \Delta H + \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = 0, \end{cases}$$

где  $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{\partial}{r \partial r} + \frac{d^2}{dz^2}$  – оператор Лапласа. Объемная деформация

$\varepsilon = \frac{1-2\mu}{E} (\sigma_r + \sigma_t + \sigma_z)$  должна удовлетворять уравнению Лапласа

$\Delta \varepsilon = \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial r^2} + \frac{\partial \varepsilon}{r \partial r} + \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial z^2} = 0$ , что позволяет, с учетом нестационарности задачи,

записать составляющие перемещений  $U(t)$  и  $H(t)$  в точке натекания струи на поверхность как

$$U(t) = -\frac{(1-2\mu)p_0(t)\left[\frac{D_k}{2}\right]^2}{4G}, \quad 0 < \frac{D_i}{2} < \frac{D_k}{2}; \quad H(t) = -\frac{(1-2\mu)p_0(t)D_k}{2G},$$

где  $G, \mu$  – модуль сдвига и коэффициент Пуассона обрабатываемого материала соответственно;  $p_0(t)$  – давление струи на преграду  $p_0(t) = k\rho v_n^2(t)$ ,  $k$  – коэффициент формы поверхности, в первом приближении может быть  $k = 1$ ,  $\rho$  – плотность гидроабразивной суспензии, определяемая массовым расходом абразива. Изменение давления на преграде происходит вследствие неравномерного истечения струи из сопла со сверхзвуковыми скоростями с последующим смешиванием с абразивным потоком, в результате чего скорость суспензии снижается до  $v_n(t)$ .

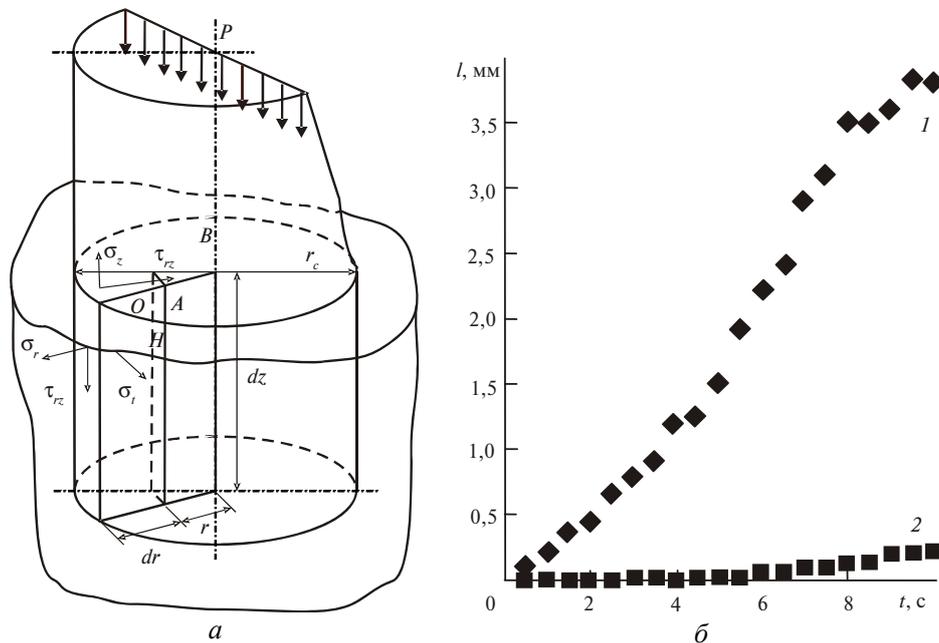


Рис. 1. Схема воздействия струи на обрабатываемую поверхность (а) и кинетика формирования лунки гидрорезания (б): 1 – ТС; 2 – ПКНБ.

В [2] показано, что особенностью разрезания заготовок из ТС является то, что взаимодействие натекающих частиц абразива с обрабатываемой поверхностью сопровождается локальными высокоинтенсивными нагрузками, приводящими к упругопластическим макродеформациям сжатия в локальных объемах поверхностного слоя. Эти нагрузки воспринимает в основном карбидный скелет (для сплавов с содержанием кобальта ~ 10 %) ТС. Дальнейшее подхватывание абразивной частицы потоком жидкости приводит к снятию нагрузки сжатия, частичному упругому восстановлению деформированного объема поверхностного слоя, что обуславливает перераспределение напряжений между составляющими структуры ТС.

При этом сначала разрушаются границы зерен карбидов, в них появляются микротрещины, происходит пластическая деформация кобальтовой связи по дислокационному механизму [5, 6]. Далее происходит разрушение границ карбидов со связкой и самой связки. Значительно более высокая прочность

ПКНБ и АТП обуславливает то, что движущийся поток абразивных зерен оказывает относительно слабое влияние на обрабатываемый материал и его разрезание с приемлемой для производственных условий скоростью не наблюдается (см. рис. 1, б).

Получение начальной бороздки и образование реза ведет к искривлению струи и ее уводу от теоретической оси в сторону, противоположную движению подачи. Этому способствует избирательность разрушения, обусловленная нежесткостью струи, вследствие чего происходит формирование специфических площадок разрушения (рис. 2), положение и размер которых определяет форму фронта гидрорезания и отклонение струи на угол  $\alpha$ , величина которого обуславливается соотношением скорости  $v_z$  проникновения струи в обрабатываемый материал и скорости подачи  $s$ . Таким образом, фронт гидрорезания можно рассматривать как огибающую поверхности, образованной совокупностью площадок разрушения.

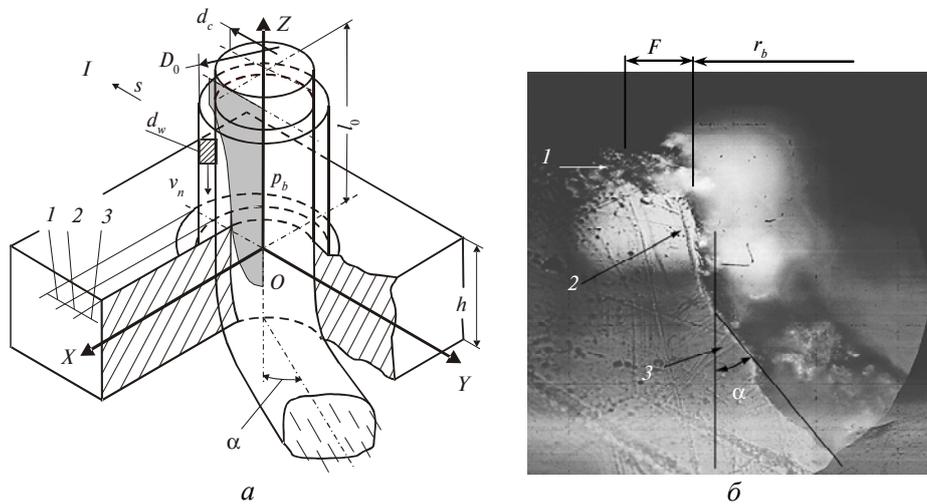


Рис. 2. Схема образования площадки разрушения на фронте гидроабразивного резания ZOY (а) и вид зоны разрезания пластины ПКНБ,  $\times 500$  (б): 1 – движение подачи; 1 – зона предразрушения; 2 – площадка разрушения; 3 – сформированный рез.

В самом деле, если разрезание материала толщиной  $h$ , согласно [7], будет происходить вследствие проявления механизмов микрорезания и деформационного разрушения, т. е.

$$h = c \sqrt{\frac{m_a v^2}{8\sigma u^2} + \frac{2m_a(1-c)v^2}{\pi \epsilon D_j}},$$

где  $c$  – постоянная процесса;  $m_a$  – массовый расход абразива;  $v$  – скорость движения абразивных частиц,  $v = \frac{2p_b f_b}{f_b \sqrt{2p_b/\rho} + m_a}$ ;  $\sigma$  – напряжение течения

материала;  $u$  – скорость подачи;  $\epsilon$  – удельная энергия материала;  $D_j$  – диаметр потока, соответствующий диаметру среза сопла, то, исходя из условия, что за время  $t$  воздействие на зону обработки произойдет  $U/d$  раз, квазистатическая

скорость внедрения площадки разрушения составляет  $v_z = \frac{u}{D_j} h$  или с учетом ранее приведенного соотношения

$$v_z = \frac{c}{D_j} \sqrt{\frac{m_a v^2}{8\sigma} + \frac{2m_a(1-c)v^2}{\pi \varepsilon D_j^2}}.$$

Анализ полученного соотношения показывает, что скорость внедрения площадки разрушения не зависит от скорости линейной подачи, а с учетом пренебрежения потерями энергии при внедрении струи в обрабатываемый материал можно считать, что элементарные площадки разрушения будут образовывать поверхность, которая для данных условий расположена под углом  $\alpha = \arctan\left(\frac{2r}{h}\right)$  относительно нормали (оси струи). При этом, снижение скорости подачи ведет к уменьшению угла, а повышение – к неполному разрезанию, но фронт разрушения все равно будет наклонен по отношению к нормали на угол  $\alpha$ . Вследствие такого наклона струя будет изменять свою форму и положение в пространстве.

Таким образом, как показано в [3], бороздка будет формироваться как перпендикулярно набегающими частицами (в зоне предразрушения и активного разрушения), так и движущимися под малыми углами атаки частицами, для которых объем удаленного материала в первом приближении будет представлять собой микрориски с профилем, близким к фрагменту цилиндра, со скруглением в начале и в конце бороздки. То есть объем удаленного материала составит

$$w_{\Sigma} = w_1 + w_2 = \frac{\pi \delta_n^2 (3r - \delta_n)}{3} + \frac{\delta_n (6a + 8b)}{15} l_c,$$

где  $\sigma_r > \sigma_b$ ;  $r$  – радиус абразивной частицы;

$$\delta_n = \frac{m \left( C \left( \frac{L}{X_c} \right)^{\frac{4}{3}} \frac{2\mu p_b}{\sqrt{2p_b \rho} + \frac{M_a}{f_k}} \right)^2 \sin \varepsilon}{2} \frac{Ra}{k_n z_n H_V};$$

$$\delta_a = \frac{m \left( C \left( \frac{L}{X_c} \right)^{\frac{4}{3}} \frac{2\mu p_b}{\sqrt{2p_b \rho} + \frac{M_a}{f_k}} \right)^2 \cos \varepsilon}{2} \frac{z_n}{k_a \sigma_b} - \frac{k_a T_p^2 \sigma_b Ra}{2m z_n},$$

где  $m$  – масса абразивных частиц;  $v_n, v_a$  – нормальная и тангенциальная составляющие скорости удара частицы с обрабатываемой поверхностью;  $Ra, H_V, \sigma_b$  – параметры шероховатости, твердость и прочность обрабатываемого материала соответственно;  $z_n$  – зернистость абразивных частиц;  $T_p$  – постоянная, учитывающая инерционность процесса микрорезания;  $k_n, k_a$  – постоянные коэффициенты;  $\varepsilon$  – угол набегающей частицы на обрабатываемую поверхность;  $l_c$  – минимальная критическая длина трещины (согласно [8])

$$l_c = \frac{0,06bE^2}{\sigma_t^2(1-\mu) \left\{ 1 + 0,4(1+\mu) \ln \left[ \frac{76(1-\mu^2)\sigma_t}{E} \right] \right\}},$$

где  $E$ ,  $b$ ,  $\sigma_t$  – модуль упругости, вектор Бюргера, предел текучести обрабатываемого материала соответственно.

При этом главными условиями формирования реза являются условия квазистатического движения площадок разрушения, которое имеет место только для малых толщин заготовки.

Любое изменение характеристик обрабатываемого материала будет приводить к снижению скорости движения площадок разрушения и образованию дефектов поверхности, способных изменять условия течения жидкости. Несмотря на то, что осуществление резания с многократным проходом поверхности эффективно в том случае, когда обрабатываемая заготовка разрушается преимущественно вследствие скользящего действия частиц абразива, т. е. в дисперсных материалах, в которых связующая компонента может быть разрушена в результате действия ударных нагрузок частиц абразива по шероховатым участкам поверхности, достижение высокого качества реза затруднено – измененные условия струйной эрозии приведут к возникновению очагов разрушения со скоростями, значительно превышающими скорость разрушения поверхности в целом, в результате чего искажения формы могут быть существенными (рис. 3).

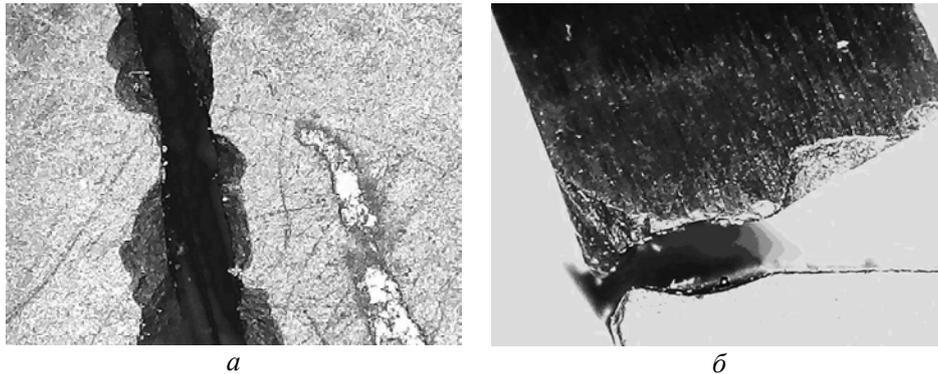


Рис. 3. Дефекты кромки реза на пластинах из ПКНБ, возникшие вследствие увода струи от теоретического положения.

Применение термо-гидродинамических струй, характерных для ЛСР, также не всегда дает желаемый результат с точки зрения требуемого качества обработанной поверхности. Так, исходя из того, что распределение тепла на поверхности поглощения радиусом  $r$  с теплоотводом от натекающей жидкости определяется уравнением [9]

$$T(x, y, z, t) = \frac{P}{\pi \frac{1}{2} \rho c} \int_0^t \frac{e^{-\frac{(x-v(t-z))^2}{4\alpha t + A^2}} e^{-\frac{y^2}{4\alpha t + B^2}}}{\left[ (4\alpha t + A^2)(4\alpha t + B^2)\alpha t \right]^{1/2}} \times \left[ e^{-\frac{z^2}{4\alpha t}} - h(\pi\alpha t)^{1/2} \operatorname{erfc} \left( \frac{z}{2(\alpha t)^{1/2}} + h(\alpha t)^{1/2} \right) e^{hz+h^2\alpha t} \right] dt,$$

где  $t$  – время с момента начала воздействия теплового импульса;  $\rho$ ,  $c$ ,  $\lambda$ ,  $\alpha = \frac{\lambda}{c\rho}$ ,  $h$  – плотность, удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности и температуропроводность материала заготовки, коэффициент теплоотдачи с поверхности заготовки соответственно;  $A$  и  $B$  – большая и меньшая полуоси эллиптического поперечного сечения луча;  $P = \pi qAB$  – мощность лазерного излучателя. Интегральное уравнение баланса тепловой энергии в произвольной области  $\omega \subset \Omega$  согласно [10] примет вид

$$\int_{\omega} \frac{\partial e}{\partial t} dv = \int_{\omega} g dv - \oint_{\partial\omega} (\mathbf{q}_T + c_g \rho_g T \mathbf{v}_f, \mathbf{n}) ds.$$

С учетом краевых условий, учитывающих наличие в зоне разрезания хладагента

$$c_p \frac{dT}{dt} - \lambda \Delta T = \frac{(T - R_0)kP}{\pi AB} \exp \left[ -2 \left( \frac{(x - vt)^2}{a^2} + \left( \frac{y}{b} \right)^2 \right) \right] \exp(-kz),$$

$$\lambda \left. \frac{dT}{dz} \right|_{z=0} = \alpha(T)(T - T_p),$$

получаем распределение температур по сечению образца, анализ которого показывает, что увеличение сечения образца приводит к существенному снижению способности струи выполнять работу разрушения, поскольку при одном и том же количестве отведенного тепла количество подведенного тепла постоянно уменьшается (рис. 4).

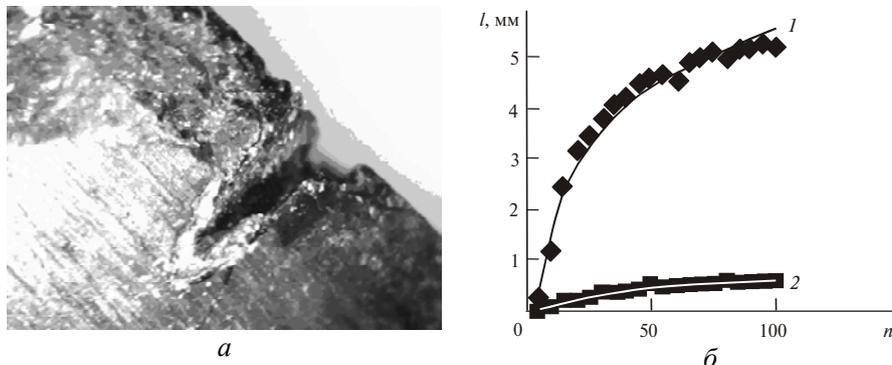


Рис. 4. Торец реза (а) и изменение глубины реза  $l$  в заготовках из ТС и ПКНБ при ЛСР (б) в зависимости от числа проходов  $n$  при высокой скорости обхода контура (свыше 500 мм/мин): 1 – ТС ( $y = 1675 \ln x - 2,149R^2 = 0,969$ ); 2 – ПКНБ ( $y = 0,5 - 0,7x^3 - 0,0002x^2 + 0,017x - 0,0673R^2 = 0,9911$ ).

Следовательно, производительность процесса ЛСР с увеличением глубины канавки будет постоянно снижаться, а форма приближаться к форме распределения излучения в сечении струи.

Изготовление изделий инструментального производства, а также деталей высокотехнологичного машиностроения в виде многослойных пластин делает целесообразным использование подходов, базирующихся на рассмотрении

функций и свойств готового изделия как совокупности результатов технологических переходов, реализованных на микро-, мезо- или макроуровнях.

Согласно [11], начальное состояние  $C_0$  объекта производства  $O$  характеризуется набором параметров, определяющих форму, размеры, материал заготовки и механические свойства материала. Конечное состояние  $C_k$  определяет форму, размеры, точность, физико-механические свойства и другие, важные с точки зрения эксплуатации, параметры. Передаточную функцию превращения  $\varphi_0$  свойств объекта из начального состояния (заготовки) в конечное (изделие) можно представить как

$$\varphi_0 : \left\{ \begin{array}{l} C_{n1} \\ C_{n2} \\ \dots \\ C_{nR} \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} C_{k1} \\ C_{k2} \\ \dots \\ C_{kT} \end{array} \right\},$$

где  $\varphi_0$  – функция технологического преобразования свойств объекта производства;  $C_{nR}$  – элементарное свойство заготовки;  $C_{kT}$  – элементарное свойство изделия;  $R, T$  – общее количество свойств заготовки и изделия соответственно.

Формирование свойств изделия осуществляется вследствие выполнения ряда технологических переходов, при котором происходит полное или частичное изменение начальных свойств. Технологические превращения заготовки в изделие достигаются целенаправленными совокупными технологическими влияниями  $N(t_k)$  материального  $S_0(t_k)$ , энергетического  $E_0(t_k)$  и информационного  $I_0(t_k)$  типов, что дает возможность представить схему формирования выходных свойств согласно рис. 5.

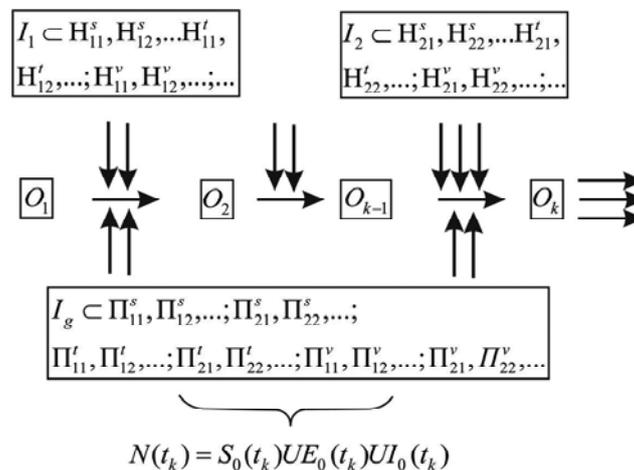


Рис. 5. Формирование свойств изделия на технологических переходах традиционным (сверху) и гибридным (снизу) инструментами.

Тогда, исходя из условия, что технологические воздействия инструмента на изделие должны осуществляться на уровнях от нанозон до изделия в целом, а изделие представляет собой трехмерный объект, для реализации совокупности вариантов технологических воздействий морфологическая матрица будет соответствовать следующему виду:

$$A^{\Pi} = \left\| \begin{array}{cccccccccccc} \Pi_{11}^s & \Pi_{12}^s \dots & \Pi_{21}^s & \Pi_{22}^s \dots & H_{11}^s & H_{12}^s \dots & H_{21}^s & H_{22}^s \dots & E_{11}^s & E_{12}^s \dots & E_{21}^s & E_{22}^s \dots \\ \Pi_{11}^t & \Pi_{12}^t \dots & \Pi_{21}^t & \Pi_{22}^t \dots & H_{11}^t & H_{12}^t \dots & H_{21}^t & H_{22}^t \dots & E_{11}^t & E_{12}^t \dots & E_{21}^t & E_{22}^t \dots \\ \Pi_{11}^v & \Pi_{12}^v \dots & \Pi_{21}^v & \Pi_{22}^v \dots & H_{11}^v & H_{12}^v \dots & H_{21}^v & H_{22}^v \dots & E_{11}^v & E_{12}^v \dots & E_{21}^v & E_{22}^v \dots \end{array} \right\|$$

где  $\Pi_{11}^s, \Pi_{12}^s, \dots; \Pi_{21}^s, \Pi_{22}^s, \dots; \Pi_{11}^t, \Pi_{12}^t, \dots, \Pi_{21}^t, \Pi_{22}^t, \dots; \Pi_{11}^v, \Pi_{12}^v, \dots; \Pi_{21}^v, \Pi_{22}^v, \dots$  – варианты прерывистых технологических воздействий по соответствующим осям системы координат  $s, t, v$ ;  $H_{11}^s, H_{12}^s, \dots; H_{21}^s, H_{22}^s, \dots; H_{11}^t, H_{12}^t, \dots; H_{21}^t, H_{22}^t, \dots; H_{11}^v, H_{12}^v, \dots; H_{21}^v, H_{22}^v, \dots$  – различные варианты непрерывных технологических воздействий по осям системы координат  $s, t, v$ ;  $E_{11}^s, E_{12}^s, \dots; E_{21}^s, E_{22}^s, \dots$  – различные варианты разовых технологических воздействий.

Наличие вариантов прерывистых технологических процессов позволяет рассматривать обработку одного элемента изделия в виде последовательной совокупности различных воздействий. При этом в случае, если выходными показателями данного элемента являются его геометрические характеристики (например, плоскостность, точность линейных размеров), такой процесс может реализоваться различными видами воздействия, более полно соответствующими свойствам элементов заготовки. Так как воздействия для обеспечения условий минимальной погрешности формы должны осуществляться без переустановки заготовки и смены ее положения в устройстве базирования, подобные процессы следует считать гибридными.

Пусть некий элемент изделия  $E_m$  получается при реализации прерывистых технологических воздействий  $\Pi_{ij}^t$  и  $\Pi_{ij+k}^t$ . Можно ожидать, что для их реализации требуется соответственно  $k$  инструментов. Если принять во внимание, что создание нового инструмента осуществляется на основе известных, т. е. имеет место выражение  $R_{nj} = \bigcap_{i=1}^{\rho_i} R_{si}$  где  $R_{nj}$  – поле образований новых видов инструментов;  $R_{si}$  –  $i$ -я совокупность известных решений;  $\rho_i$  – весомость подмножества известных решений, то вновь созданный инструмент может объединить в одно целое средства для принципиально различных видов воздействия.

Пусть совокупности свойств двух инструментов представляют собой выражения

$$I_1 = \left\{ \begin{array}{ccc} \rho_{11} S_{11}^1 & \rho_{21} S_{21}^1 & \rho_{k1} S_{k1}^1 \\ \dots & \dots & \dots \\ \rho_{1j} S_{1j}^1 & \rho_{2j} S_{2j}^1 & \rho_{kj} S_{kj}^1 \end{array} \right\}, I_2 = \left\{ \begin{array}{ccc} \rho_{11} S_{11}^2 & \rho_{21} S_{21}^2 & \rho_{k1} S_{k1}^2 \\ \dots & \dots & \dots \\ \rho_{1j} S_{1j}^2 & \rho_{2j} S_{2j}^2 & \rho_{kj} S_{kj}^2 \end{array} \right\}.$$

Тогда гибридный инструмент, полученный на основе принципа морфологического перебора и объединения свойств, будет состоять из  $m$  элементов, причем  $m < k + j$ , поскольку часть свойств исходных инструментов может быть объединена. Таким образом, показатель гибридизации созданного инструмента  $k_g = \frac{k+j}{m}$ . Такой показатель дает возможность находить рациональные технические решения гибридного инструмента исходя из совокупности требуемых свойств обработанных изделий, а также возможности достижения их имеющимися средствами.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В [3] получены сравнительные результаты оценки производительности при различных методах струйной обработки. В настоящем исследовании повторены эксперименты с заготовками из ТС и ПКНБ, однако основное внимание было сосредоточено на показателях качества обработанных поверхностей – шероховатости и взаимном расположении, а также отклонении их значений от теоретически возможных.

Полученные результаты (табл. 1), совместно с данными по динамике разрезания заготовок из ТС и ПКНБ (табл. 2), могут быть применены для определения рациональных условий работы гибридного инструмента. Подобный инструмент может быть эффективно использован при разрезании АТП.

**Таблица 1. Точность и шероховатость поверхностей заготовок из ТС и ПКНБ при струйных методах разрезания**

Вид обработки		ГАР	ЛР	ЛРО	ЛСР
Режимы обработки		100 мм/мин, 350 МПа, 0,5 кг/мин	30 мм/мин, 400 Вт, 100 Гц	30 мм/мин, 400 Вт, 100 Гц, 0,5 МПа	
		–		2,80 мм	1,05 мм
ТС	$R_a$ , мкм	12,5	6,3	6,3	3,2
	$h$ , мм/прох.	6,4	5,9	3,5	3,0
	$\delta$ , мм/5,0 мм	0,3–0,9	0,02–0,15	0,02–0,09	0,02–0,04
ПКНБ	$R_a$ , мкм	–	6,3–3,2	3,2	2,5–3,2
	$h$ , мм/прох.	< 0,01	3,0–3,2	2,4	1,5–1,75
	$\delta$ , мм/5,0 мм	> 0,80	0,05–0,10	0,02–0,05	

Как показано выше, любое начальное отклонение формы реза, особенно при реализации прерывистых технологических процессов, искривляет струю и дальнейшая обработка приводит только к ухудшению качества изделия, прежде всего за счет прогрессирующего отклонения формы реза.

Картина разрушения алмазосодержащего слоя АТП аналогична. Так, на рис. 6 показаны дефекты реза АТП в виде отклонения от перпендикулярности кромки при неполном разрезании слоя ПКА. Благодаря применению гибридного метода обработки удалось исключить не только дефекты формы, но и нарушение структуры материала (рис. 7).

**Таблица 2. Скорость эрозии материала заготовок из ТС и ПКНБ при струйных методах разрезания**

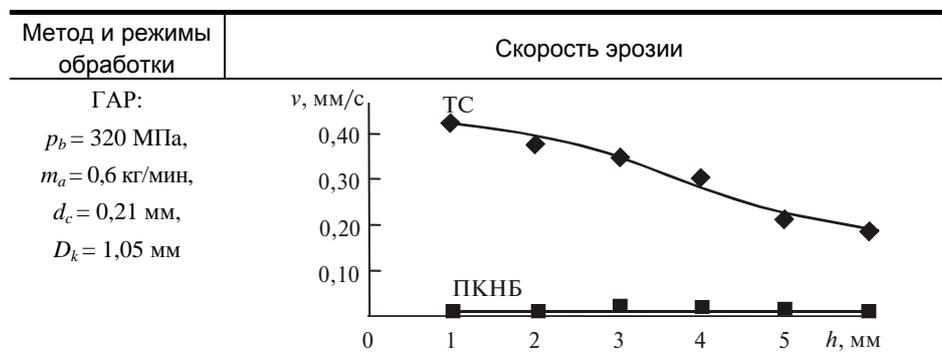


Таблица 2. (Продолжение)

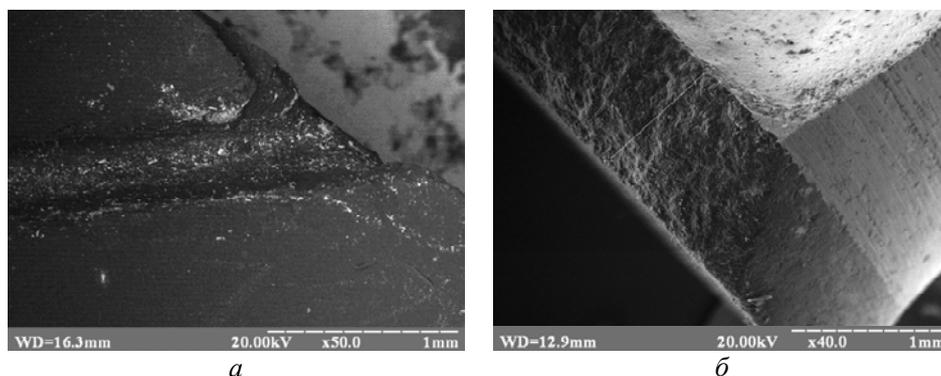
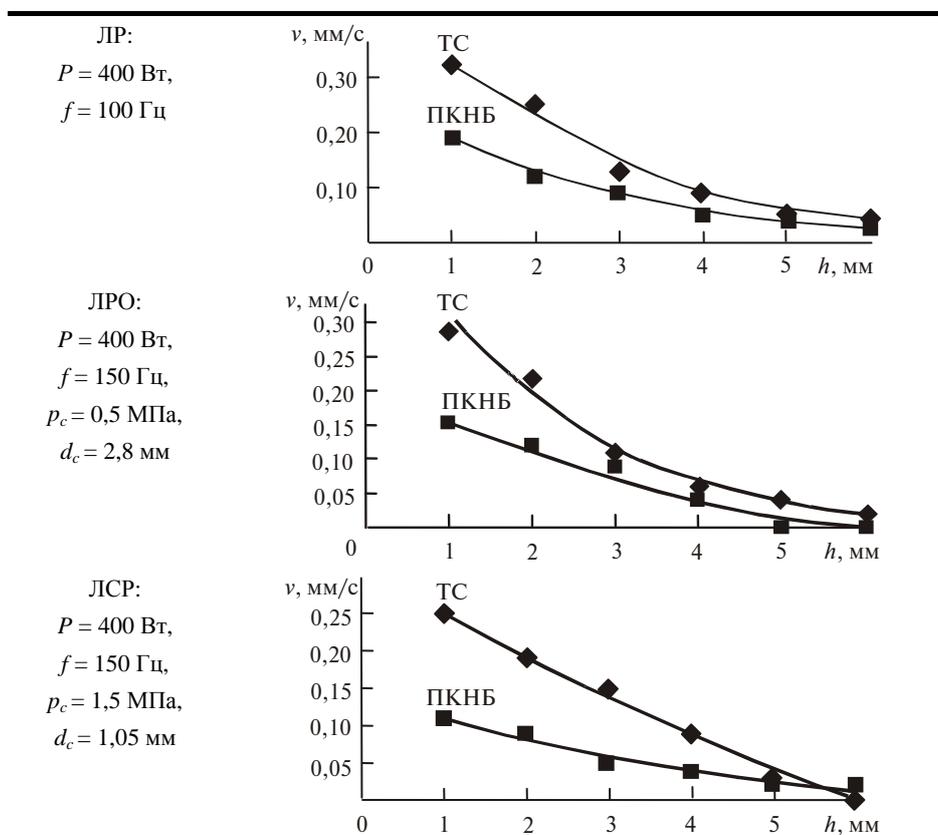


Рис. 6. Дефекты формы начальной скрайба в ПКА и поверхность реза.

Сравнение результатов, приведенных в табл. 1 и 2, а также анализ зависимости скорости проникновения струи в обрабатываемую заготовку (см. рис. 1, б) дает основание считать, что процесс разрезания АТП будет более эффективным и производительным, если обработку вести гибридным инструментом. В этом случае на первом этапе получают качественный скрайб в слое ПКА, в дальнейшем ГАР завершается разрезание, используя полученный скрайб в виде щелевой маски, о чем сообщается в [12]. При этом ГАР обеспечивает зачистку поверхности реза в слое ПКА (см. рис. 7, в).

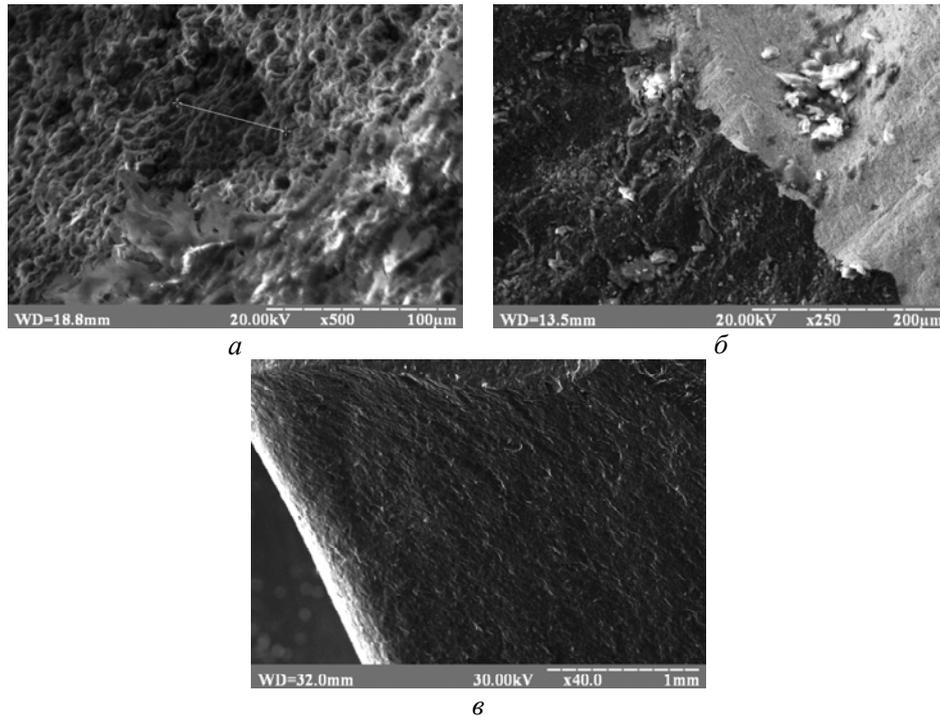


Рис. 7. Поверхность реза в АТП после ЛСР (а, б) и последующей ГАР (в): слой ПКА (а, в), область ПКА–ТС (б).

Нужно отметить, что применение ГАР после ЛСР дает возможность повысить производительность разрезания АТП в несколько раз, особенно в случае, когда обработке подвергаются пластины значительной толщины.

Таким образом, гибридный процесс разрезания АТП представляется следующим образом (рис. 8). На первом этапе с применением ЛСР идет формирование скрайба с прогрессирующим падением производительности обработки. Задача этого этапа не только в получении геометрически правильной формы реза, но и в устранении донных дефектов, могущих привести в дальнейшем к отклонению инструмента при ГАР и получению дефекта торца. На втором этапе по сформированному скрайбу направляется гидроабразивный поток, причем ГАР может быть однопроходным.

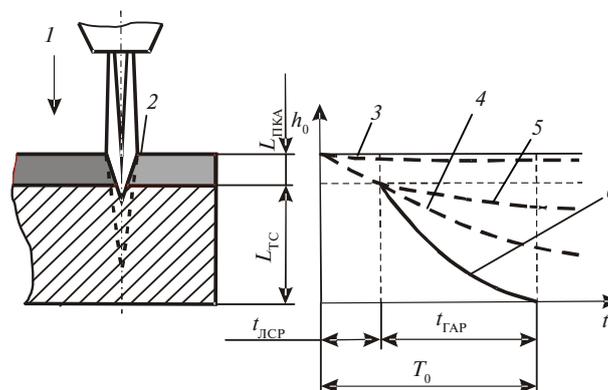


Рис. 8. Схема формирования реза в АТП: направление воздействия (1), фокальная плоскость (2), ГАР<sub>ПКА</sub> (3), ожидаемая динамика ЛСР (4), реальная динамика ЛСР (5), ГАР<sub>ТС</sub>, примененная после получения бороздки в ПКА (6);  $L_{ПКА} = 0,8$  мм,  $L_{ТС} = 3,0$  мм,  $t_{ЛСР} = 15$  с,  $t_{ГАР} = 52$  с,  $T_0 = 67$  с.

Сравнение диаграмм скорости разрезания АТП и ПКНБ показывает (рис. 9), что производительность процесса определяется получением скрайба в слое сверхтвердого материала.

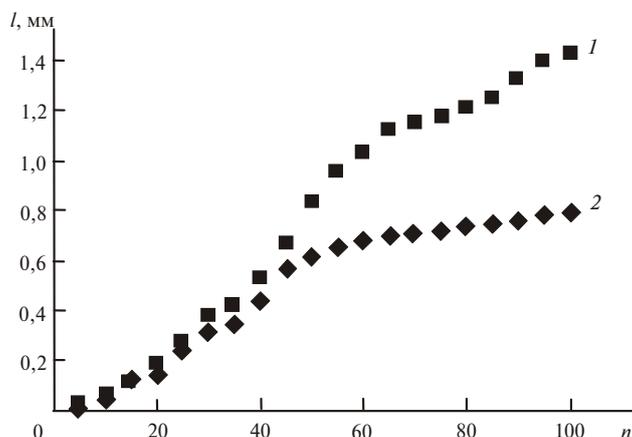


Рис. 9. Глубина реза  $l$  в заготовках из ПКНБ (1) и АТП (2) при ЛСР в зависимости от числа проходов  $n$ ; скорость линейной подачи – 35 мм/мин, частота импульсов – 75 Гц.

## ВЫВОДЫ

Проведенные исследования с использованием ГАР, ЛР, ЛРО и ЛСР позволили изучить интенсивность разрезания заготовок из ТС, ПКНБ и АТП. Показано, что для таких материалов как ПКНБ и АТП гипотеза о квазистационарной скорости разрушения неприемлема, что обуславливается структурой и высокой твердостью композитов. Установлено, что с ростом глубины реза скорость внедрения струи в обрабатываемую заготовку имеет выраженную тенденцию к снижению.

Проанализирована особенность разрезания двухслойных композиций, включающих слой ПКА на основе из ТС, и показано, что использование принципов функционального подхода позволяет предложить гибридный процесс обработки и соответствующий гибридный инструмент (сочетающий ЛСР и ГАР), который способен эффективно и производительно выполнять разрезание заготовок из подобных материалов. Рассмотрены условия повышения производительности процесса разрезания АТП.

Для совершенствования рассмотренного подхода, дальнейшие исследования должны быть направлены на оптимизацию режимов обработки и поиск способов повышения качества реза путем подбора рациональных режимов процесса разрезания и конструктивных решений гибридного инструмента.

*Досліджено інтенсивність розрізання заготовок з твердого сплаву, полікристалічного надтвердого матеріалу на основі кубічного нітриду бору, а також алмазно-твердосплавної пластини з використанням гідроструменевої, лазерної, лазерної з охолодженням рідиною і лазерно-струменевої технологій. Проаналізовано особливості розрізання двошарових композицій, що включають шар полікристалічного алмазу на основі з твердого сплаву. Показано ефективність гібридного процесу обробки, що поєднує лазерно-струменево і гідроструменево технології, який дозволяє продуктивно виконувати розрізання заготовок необхідного профілю.*

**Ключові слова:** струменева обробка, гібридне різання, твердий сплав, ПНТМ, алмазно-твердосплавна пластина.

Досліджено інтенсивність розрізання заготовок з твердого сплаву, полікристалічного надтвердого матеріалу на основі кубічного нітриду бору, а також алмазно-твердосплавної пластини з використанням гідроструменевої, лазерної, лазерної з охолодженням рідиною і лазерно-струменевої технологій. Проаналізовано особливості розрізання двошарових композицій, що включають шар полікристалічного алмазу на основі з твердого сплаву. Показано ефективність гібридного процесу обробки, що поєднує лазерно-струменеву і гідроструменеву технології, який дозволяє продуктивно виконувати розрізання заготовок необхідного профілю.

**Ключові слова:** струменева обробка, гібридне різання, твердий сплав, ПНТМ, алмазно-твердосплавна пластина.

1. *Инструменты из сверхтвердых материалов* / Под ред. Н. В. Новикова и С. А. Клименко. – М.: Машиностроение, 2014. – 608 с.
2. Salenko A. F., Shchetinin V. T., Fedotyev A. N. Improving accuracy of profile hydro-abrasive cutting of plates of hardmetals and superhard materials // *J. Superhard Mater.* – 2014. – **36**, N 3. – P. 199–207.
3. Salenko A. F., Shchetinin V. T., Fedotyev A. N. et al. Methods of cutting for workpieces of hardmetal and cBN-based polycrystalline superhard material // *J. Superhard Mater.* – 2015. – **37**, N 4. – P. 271–281.
4. Лурье А. И. Теория упругости. – М.: Наука, 1970. – 940 с.
5. Klímenko S. A., Mel'niichuk Yu. A., Vstovskii G. V. Interrelation between the structure parameters, mechanical properties of sprayed materials and the tool life in cutting them // *J. Superhard Mater.* – 2008. – **30**, N 2. – P. 115–121.
6. Fedotyev A., Fedotyeva L. The prospects of carbolloies waste utilization as wearproof coverings // *Известия на Техническия университет Габрово.* – 2010. – **39**. – С. 30–33.
7. Саленко А. Ф., Струтинский В. Б., Загирняк М. В. Эффективное гидрорезание. – Кременчуг: Изд-во КрНУ, 2008. – 488 с.
8. Иванова В. С., Баланкин А. С., Бунин И. Ж., Оксогоев А. А. Синергетика и фракталы в материаловедении. – М.: Наука, 1994. – 384 с.
9. Schulz W., Niessen M., Eppelt U., Kowalick K. Simulation of laser cutting // *The Theory of Laser: Mat. Proces* / Ed. J. M. Dowden. – Springer Series in Materials Science, N 119. – Netherlands: Springer, 2009. – P. 21–69.
10. Гиндин П. Д. Математическая модель термораскалывания хрупких анизотропных материалов // *Поверхность.* – 2010. – № 1. – С. 14–18.
11. French M. J. Design principles applied to structural functions of machine components // *J. Eng. Design.* – 1992. – **3**, N 3. – P. 229–241.
12. Salenko O., Gabuzyan G., Myronov Y., Nikitin V. About some results of processing SiC-microarrays by Hydroabrasive Precision Jet // *J. Mech. Eng. NTUU "Kyiv Polytechnic Institute"*. – 2013. – P. 178–184.

Поступила 21.03.16