

УДК 621.924.93

А. Ф. Саленко*, **В. Т. Щетинин**, **А. Н. Федотьев**,

В. А. Дудюк (г. Кременчуг)

С. А. Клименко**, **А. И. Боримский**,

Т. А. Сороченко (г. Киев)

*salenko2006@ukr.net

**atmu@ism.kiev.ua

Резка заготовок из твердого сплава и поликристаллического сверхтвердого материала на основе кубического нитрида бора

Представлены результаты исследований гидроабразивной, лазерной с продувкой зоны резания газом, лазерной с охлаждением жидкостью и лазерно-струйной резки заготовок из твердого сплава и поликристаллического сверхтвердого материала на основе кубического нитрида бора. Показано, что гидроабразивная резка практически не приводит к появлению на обработанной поверхности слоя термической деструкции, при лазерной резке формируется дефектный слой толщиной до 0,8 мм, который может быть уменьшен до 0,10–0,55 мм при реализации лазерного резания с водяным охлаждением, с одновременным повышением глубины резания на 50–70 %. Лазерно-струйное резание обеспечивает минимальную ширину реза и величину зоны термической деструкции не более 0,06 мм при шероховатости поверхности до $Ra = 3,2\text{--}6,3$ мкм.

Ключевые слова: твердые сплавы, сверхтвердые материалы, гидроабразивная, лазерная, лазерно-струйная резка.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

В настоящее время потребление твердых сплавов (ТС) и поликристаллических сверхтвердых материалов (ПСТМ) на основе кубического нитрида бора в различных отраслях народного хозяйства неуклонно возрастает. Изделия в виде пластин, шариков, колец и призматических тел находят применение в современном режущем инструменте, конструкциях машин, энергетического оборудования и т. д. Несмотря на то, что изделия из ТС и ПСТМ при изготовлении имеют вид, близкий к требуемому, все же существует необходимость выполнения окончательной обработки для обеспечения качества поверхностного слоя и точности формы.

Существующие методы резки заготовок из указанных материалов имеют ограниченное использование. Это связано с тем, что электроэрозионная обработка требует низкого электрического сопротивления самой заготовки; ультразвуковая резка может осуществляться инструментом-концентратором только определенной геометрической формы.

Усложнение форм изделий различного технического и технологического назначения, а также необходимость обеспечения высокой точности, надежности и долговечности созданных продуктов обуславливают поиск новых мето-

© А. Ф. САЛЕНКО, В. Т. ЩЕТИНИН А. Н., ФЕДОТЪЕВ, В. А. ДУДЮК, С. А. КЛИМЕНКО, А. И. БОРИМСКИЙ,

Т. А. СОРОЧЕНКО, 2015

дов и приемов резки, которые были бы как энергоэффективными, так и надежными, и простыми при реализации. Задача осложняется еще и тем, что изделие может предусматривать не только создание новых поверхностей, полученных сквозным прорезанием, но и требовать формирования участков с поднутрениями, выступами или глухими отверстиями различной формы.

Широкие возможности открываются при использовании технологии струйной и лазерной резки заготовок из ТС и ПСТМ [1].

Целью настоящего исследования была сравнительная оценка эффективности струйной и лазерной технологий резки заготовок из ТС и ПСТМ для использования в современном производстве.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Резы в заготовках из твердого сплава Т5К10 и ПСТМ на основе КНБ “борсинит” выполняли методами гидроабразивной (ГАР), лазерной (ЛР), лазерной с охлаждением жидкостью (ЛРО) и лазерно-струйной резки (ЛСР).

При ЛР использовали лазерно-струйный комплекс ЛСК-400-5, оснащенный гидроабразивной головкой с водяным соплом $d_c = 0,22$ мм и калибровочной трубкой $D_k = 1,05$ мм. Плоские заготовки из твердого сплава толщиной 7 мм и из ПСТМ толщиной 4 мм крепили на рабочем столе с помощью универсального зажима.

ГАР производили с расходом абразива до 0,5 кг/мин и под давлением жидкости 250 МПа. При резке твердосплавных заготовок в качестве абразива использовали гранатовый песок фракции 50/100, при резке заготовок из ПСТМ – гранатовый песок 300–400 меш.

В твердосплавных заготовках выполняли отверстия диаметром $D_o = 5,0 \pm 0,025$ мм, обработку производили по контуру с постоянной (300 мм/мин) и переменной (100–300 мм/мин) скоростями подачи. На заготовках из ПСТМ при многопроходной обработке выполняли резы с подачей до 500 мм/мин.

ЛРО выполняли лучом импульсного Nd:YAG-лазера мощностью 400 Вт, с частотой следования импульсов 75 Гц.

ЛР и ЛСР выполняли с использованием импульсного лазера того же типа, работающего с частотой 100 Гц, что обуславливалось обеспечением условий импульсного нагрева (с испарением столба жидкости) и охлаждения обрабатываемой поверхности. Для реализации ЛСР установку оснащали специальной лазерно-струйной головкой.

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 $\varnothing 2,8$ мм под избыточным давлением 0,05 МПа.

Подачу жидкости при ЛСР производили через сопло $\varnothing 1,5$ мм под давлением 25–50 МПа непосредственно в центр фокуса лазера. ЛРО выполняли с подачей охлаждающей жидкости через сопло $\varnothing 2,5$ мм под давлением 1,5–3,0 МПа. Жидкость предварительно фильтровали. Режимы работы лазера оставались неизменными.

Для получения тестовых резов исследуемых заготовок лазерной головке сообщалось прямолинейное движение с рабочей подачей 100–500 мм/мин. Расстояние между срезом сопла и поверхностью изделия устанавливали по расположению фокальной плоскости на поверхности изделия, что обеспечивало максимальную концентрацию энергии в пятне контакта и, соответственно, наибольшую температуру в месте действия луча.

После обработки оценивали глубину h и ширину b бороздки, получаемой при однократном проходе или при реализации серии N проходов, отклонение от перпендикулярности получаемых кромок на угол Δ , а также величину зоны термической деструкции в поверхностном слое заготовки.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В сравнении с другими методами резки ГАР имеет ряд неоспоримых преимуществ, среди которых главным является практически полное отсутствие в поверхностном слое заготовки термических напряжений и дефектов, связанных с локальным нагревом.

Разрушение материала под действием гидроабразивного потока происходит вследствие полидеформационного повреждения поверхности с одновременным разрушением самих абразивных частиц. Это особенно характерно для случая натекания гидроабразивной струи под углами, близкими к нормальному (т. е. для случаев, когда сквозного прорезания заготовки нет, а частицы бомбардируют поверхность, вызывая деформацию в микрообъемах и активизируя зарождение и развитие начальных микродефектов в материале).

Разрушение обрабатываемого материала, зарождение и развитие лунки гидроэрозии вследствие проявления микрорезания при таком натекании скажется весьма незначительно, поскольку активное разрастание дефектов поверхности, обусловленных начальным упругим деформированием в точке удара частицы, возможно только при изменении вектора движения частицы. Иными словами, микроцарапина на поверхности возникает в момент, когда при ударе о поверхность увлекаемая потоком частица меняет направление движения и выносится из зоны обработки. Малый запас кинетической энергии требует многократного действия частиц на поверхность.

В ТС и ПСТМ локальные динамические нагрузки от движущейся абразивной частицы воспринимает в основном твердый карбидный и нитридный скелеты. При выносе частицы нагрузка снимается, вследствие чего происходит частичное упругое восстановление деформированного объема материала поверхности слоя с появлением локальных растягивающих напряжений и перераспределением напряжений между структурными составляющими композита.

Изучение поверхностей реза в различные моменты времени позволило установить последовательность развития эрозионной воронки в ТС и ПСТМ – при натекании потока вначале локально нагружаются границы зерен скелета, происходит пластическое деформирование связующего по дислокационному механизму, а затем наблюдается когезионное разрушение границ зерен скелета и самого связующего с образованием микролунки.

На макроуровне особенности гидроабразивной резки ТС и ПСТМ материалов связаны с тем, что:

- скорость “проникновения” струи в материал заготовки непостоянна: на первом этапе она имеет тенденцию к росту, а в дальнейшем – к снижению. При получении глубоких (в несколько диаметров D_k струи) глухих отверстий возможно полное прекращение процесса резания вследствие уменьшения упруго-пластических локальных деформаций материала в зоне обработки и потери энергии потока (рис. 1). При этом в заготовках из ПСТМ снижение глубины прорезания происходит более динамично, вплоть до полного прекращения удаления материала;
- формирование начальной канавки для отвода жидкости при сообщении струе движения подачи значительно повышает эффективность обработки за

счет интенсификации микрорезания. При этом микрорезание интенсифицируется за счет разрушения материала не только набегающим потоком, но и периферийной частью струи, в которой скорость движения частиц существенно выше, вследствие чего многопроходная резка является более эффективной и более целесообразной, чем однопроходная;

– наличие в материале обрабатываемого образца зон повышенной твердости, а также способность струи обтекать преграды приводит к ее отклонению от предполагаемого направления движения при заданных условиях перемещения. При этом с ростом скорости линейной подачи возрастает отклонение струи, что при увеличении глубины канавки обуславливает снижение энергетических параметров струи. Таким образом, скорость подачи при многопроходной резке должна быть переменной – более высокой в начальный момент процесса обработки и уменьшаться при углублении воронки.

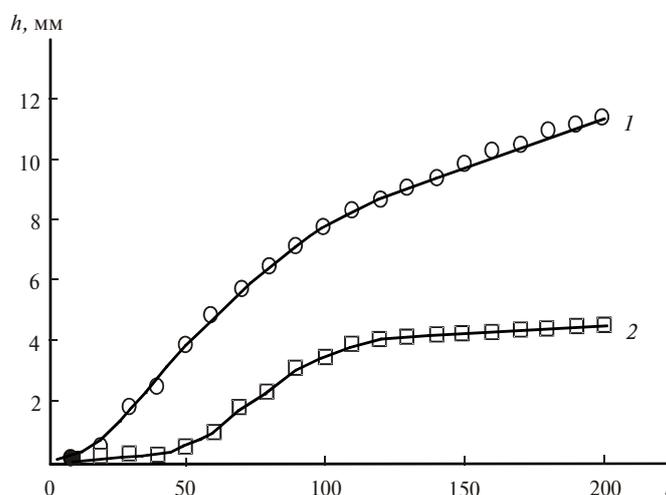


Рис. 1. Зависимость глубины канавки от количества циклов обработки (контурная подача – 500 мм/мин, давление жидкости $p = 290$ МПа, расход абразива – 0,35 кг/мин): 1 – ТС; 2 – ПСТМ.

Анализ отверстия, полученного в заготовке из ТС, показал, что многопроходная обработка является не только более эффективной, но и предупреждает образование ряда дефектов, в первую очередь, макрогеометрического характера. Работа с постоянной скоростью обхода контура приводит к существенному искажению контура на выходе струи (т. е. ведет к неисправимому браку), в то время как снижение скорости при увеличении глубины реза, несмотря на большее время обработки, позволяет получить отверстие с отклонением от круглости на выходе $\leq 0,4$ мм.

Модельное исследование напряженно-деформированного состояния образца в зоне реза показало, что при перпендикулярном натекании струи имеет место высокоинтенсивная многоцикловая локальная нагрузка, достаточная для формирования и развития сетки ориентированных под определенными углами микротрещин. Для изменения механизма взаимодействия струи с обрабатываемой заготовкой резку выполняли скользящей струей, натекающей под углом 60° , что позволило вместо ударно-релаксационного разрушения материала активизировать его микрорезание, характеризующееся в 2–

3 раза большей производительностью. Подобный эффект детально изложен при анализе условий разрушения материалов, проведенном в [2].

Зависимость интенсивности съема твердого сплава от количества проходов струи имеет сложный характер – после десяти проходов со скоростью контурной подачи 450–500 мм/мин формируется углубление 0,25–0,30 мм, в дальнейшем интенсивность съема резко возрастает, а после формирования отверстия глубиной 3,0–3,5 мм снижается.

При обработке заготовок из более твердого и хрупкого ПСТМ, наряду с уменьшением производительности резки, имеют место сколы на заготовке на выходе струи. Последнее обусловлено следующим:

– поворот рабочей головки и ее наклон относительно обрабатываемой поверхности обуславливают появление ошибки позиционирования, в результате чего струя получает начальное отклонение на угол, зависящий от соотношения скорости разрушения материала и скорости линейной подачи и достигающий 90° , направление реза изменяется, увеличивается его ширина на 10–25 %, а сам рез формируется с кромками, имеющими наклон 10° – 15° относительно оси струи (рис. 2, *а*);

– нижняя часть кромки реза на выходе струи характеризуется низким качеством, что обусловлено интенсивным развитием системы трещин, приводящих к скалыванию фрагментов заготовки (см. рис. 2, *б*). Изменение схемы нагружения и предварительное создание сжимающих напряжений в заготовке, позволяет повысить качество кромок, избежав сколов. Одним из путей обеспечения качества реза является обеспечение полного контакта обрабатываемой заготовки со стороны выхода струи с опорной поверхностью приспособления, на которую она базируется.

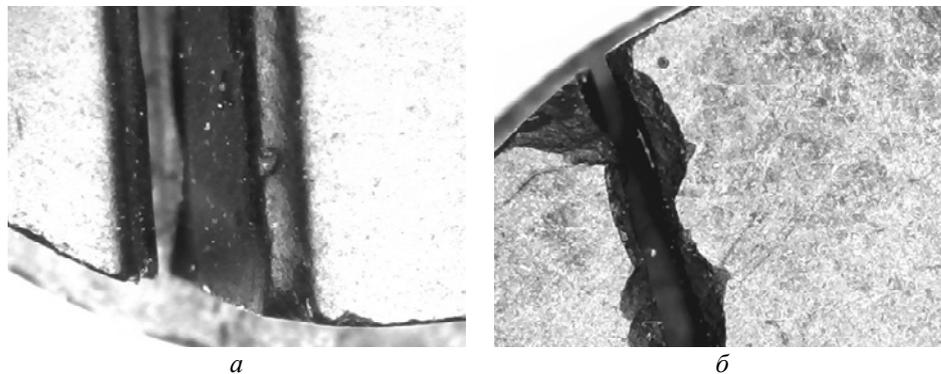


Рис. 2. Рез на заготовке из ПСТМ с дефектом, вызванным начальным отклонением струи (*а*), сколы на торце заготовки на входе струи (*б*); $\times 50$.

Несмотря на традиционные представления об относительно низкой температуре в зоне реза, при обработке ПСТМ наблюдали яркое свечение части струи на участке между соплом и обрабатываемой поверхностью. Учитывая результаты, полученные в [3], можно предположить, что локальная температура в зоне резания превышает 1000°C , а в тонком поверхностном слое возможны изменения как самих зерен скелета композита, так и оплавление связки, вследствие чего частицы абразива шаржируются в поверхность реза (рис. 3).

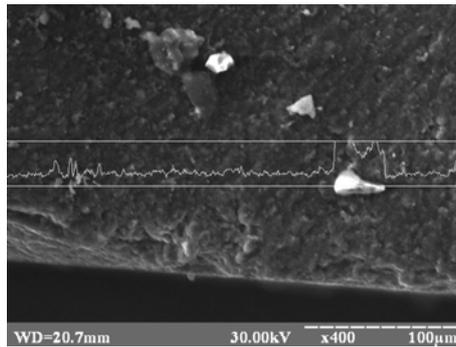


Рис. 3. Абразивные частицы на поверхности реза заготовки из ПСТМ.

Количество частиц на обработанной поверхности зависит от режимов обработки и несколько возрастает при снижении интенсивности струйного воздействия. При этом видимых изменений структуры материала в сечении, перпендикулярном линии реза, не обнаружено. Отсутствуют также и дефекты в виде локальных или магистральных трещин, а также трещин, ветвящихся между отдельными зёрнами.

Альтернативой ГАР является резка лучом лазера. Использование длиннофокусной (> 80 мм) оптики позволяет получать достаточно прямые резы в заготовках толщиной 5–10 мм, без существенного наклона поверхностей реза. Однако, по свидетельству [4], использование лазера как с продувкой зоны реза, так и без нее, при обработке ТС и ПСТМ весьма проблематично. Причина заключается в том, что термическое воздействие на композит ведет не только к определенным структурно-фазовым изменениям в объеме материала, прилегающего к зоне обработки, но и вызывает появление значительных остаточных термических напряжений в заготовке, что приводит к ее хрупкому разрушению даже при незначительной нагрузке. Кроме того, замечено существенное снижение прочности зерен КНБ и появление металлических включений на поверхности кристаллов, что ухудшает прочностные свойства ПСТМ.

При анализе процесса исходили из того, что плотность поглощенной энергии при использовании в качестве источника излучения твердотельного или газового лазера определяется из выражения [5]

$$q(x) = q_0 \exp(-x^2/r^2),$$

где q_0 – плотность мощности излучения в центре пятна фокусировки; r – радиус луча при распределении плотности мощности излучения по закону Гауса; x – радиальное расстояние от центра теплового источника.

Распределение тепла на поверхности поглощения радиусом r определяется уравнением

$$T(r, z, t) = \frac{q_{\max} r^2}{\lambda} \left(\frac{a}{\pi} \right)^{1/2} \int_0^t \frac{P(t-t') \exp\left[\frac{z^2}{4at'} - \frac{r^2}{4at'} \right]}{\sqrt{t'(4at' + r^2)}} dt',$$

где $a = \frac{\lambda}{\rho c}$ – температуропроводность материала заготовки, ρ , c , λ – плотность, удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности соответ-

венно; q_{\max} – максимальная плотность мощности излучения в центре пятна; t – время с момента начала воздействия теплового импульса; $P(t) = q(t)/q_{\max}$.

При перемещении лазерного луча по поверхности полубесконечного тела со скоростью v , при условии пренебрежения потерями тепла с поверхности, ее температура в точке с координатами (x, y, z) определяется как

$$\bar{T} = \frac{16}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} \frac{1}{\sqrt{(\bar{c}'^2 + \bar{t}'^2)(\bar{b}'^2 + \bar{t}'^2)}} \exp \left[-\frac{(2\bar{x}'^2 + \bar{v}'\bar{t}')^2}{4(\bar{c}'^2 + \bar{t}'^2)} - \frac{\bar{y}'^2}{\bar{b}'^2 + \bar{t}'^2} - \frac{\bar{z}'^2}{\bar{t}'^2} \right] d\bar{t}',$$

где $\bar{T} = 16\sqrt{\pi\lambda r T}/PA_0$; $\bar{v}' = v/2a$; $\bar{x}' = \frac{x}{r}$; $\bar{y}' = \frac{y}{r}$; $\bar{z}' = \frac{z}{r}$; $\bar{c}' = \frac{c}{r}$;

$\bar{b}' = \frac{b}{r}$; $r^2 = cb$; A_0 – отражательная способность материала заготовки; P – мощность лазерного излучения; b, c – параметры распределения плотности мощности излучения (закон Гаусса).

Анализ приведенных уравнений дает основание полагать, что участок заготовки с термической деструкцией материала может быть весьма значительным, особенно при резке толстых заготовок. По этому показателю целесообразно сравнить различные варианты выполнения реза – ЛР, ЛРО и ЛСР.

При использовании жидкости в качестве хладагента при одновременном действии излучения на нормально ориентированную поверхность по уравнению, предложенному в [6], можно определить температурное поле для случая, когда хладагент – жидкость под давлением – не подается, а затем ввести начальные условия, учитывающие наличие такого охлаждения. Тогда

$$T(x, y, z, t) = \frac{P}{\sqrt{\pi r c}} \times \int_0^t \frac{e^{-\frac{(x-v(t-z))^2}{4a\tau+A^2}} e^{-\frac{y^2}{4a\tau+B^2}}}{\left[(4a\tau+A^2)(4a\tau+B^2)a\tau \right]^{1/2}} \left[e^{-\frac{z^2}{4a\tau}} - h(\pi a\tau)^{1/2} \operatorname{erf} c \left(\frac{z}{2(a\tau)^{1/2}} + h(a\tau)^{1/2} \right) e^{hz+h^2a\tau} \right] d\tau,$$

где h – коэффициент теплоотдачи с поверхности заготовки; A и B – большая и меньшая полуоси эллиптического луча; $P = \pi qAB$ – мощность лазерного излучателя.

Процесс теплопроводности в объеме заготовки, ограниченной областью Ω , с поверхностью $\partial\Omega$, описывается скалярным полем температуры $T = T(P, t)$, векторным полем потока тепла $\mathbf{q} = \mathbf{q}(P, t)$, $P = \{(x, y, z)\} \in \Omega$ и скалярным полем с удельной тепловой энергией $e = e(T)$.

По результатам исследования [7], эти поля порождаются источниками тепла мощностью W_s и зависят от стоков тепла мощностью W_g (за счет гидродинамического воздействия) с поверхности $\partial\Omega$ по закону Ньютона и переносом тепла потоком газа со скоростью \mathbf{v}_f в направлении оси x .

Следовательно, интегральное уравнение баланса тепловой энергии в произвольной области $\omega \subset \Omega$ после ряда преобразований и учета начальных условий принимает следующий вид:

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

Краевые условия, учитывающие наличие в зоне резки хладагента:

$$c_p \frac{dT}{dt} - \lambda \Delta T = \frac{(T - T_1)kP}{\pi AB} \exp \left[-2 \left(\frac{(x - vt)^2}{a^2} + \left(\frac{y}{b} \right)^2 \right) \right] \exp(-kz),$$

$$\lambda \left. \frac{dT}{dz} \right|_{z=0} = \alpha(T)(T - T_2),$$

где T_1 и T_2 – температура на верхнем и нижнем участках реза соответственно; k – экспериментальный коэффициент; a – коэффициент теплообмена.

На основании анализа полученных зависимостей, опуская влияние химических превращений, которые могут протекать в зоне лазерно-струйного воздействия, можно предположить, что увеличение интенсивности охлаждения ведет к локализации температуры вокруг центра воздействия. Из-за меньшей зоны гидродинамического и термического воздействий можно ожидать разрушение материала в локальной зоне – $\leq 0,10-0,15$ мм.

Использование импульсного лазера при ЛСР позволило создать на обрабатываемой поверхности периодическое термическое нагружение с высокоинтенсивным охлаждением. При этом, глубина лунки, при постоянной скорости рабочей подачи, напрямую зависит от расхода жидкости через сопло и от его диаметра. Причина заключается в том, что разрушение материала происходит в некоторой периодически возникающей парогазовой полости, которую после прекращения действия импульса лазера должен сомкнуть струйный поток, а продукты разрушения мгновенно вымываются из зоны обработки.

При предельном режиме испарения размер образовавшейся полости зависит от полной энергии, поступающей в поверхностный слой обрабатываемой заготовки. Одновременно происходит некоторый перенос энергии вглубь заготовки, обусловленный теплопроводностью ее материала. Это явление приводит к изменению физико-механических свойств материала в некотором объеме. Задача движения границ раздела фаз с учетом теплопроводности в предположении, что тепло распространяется по нормали к поверхности, на основе одномерного нестационарного уравнения теплопроводности $\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t}$ для оценки распределения температуры $T(z, t)$ внутри материала с граничными условиями на подвижной границе $z = l(t)$ и на обратной стороне заготовки дает решение для определения безразмерной скорости движения этой границы в зависимости от безразмерного времени:

$$\frac{d\xi}{dt} = \left[1 + \varepsilon \left\{ \frac{1}{2} \operatorname{erf} c \left(\frac{\tau^{1/2}}{2} \right) - \frac{1}{(\pi\tau)^{1/2}} e^{-\frac{\tau}{4}} \right\} \right] \frac{2}{\pi} \left\{ 1 + \frac{\varepsilon}{\pi\tau^{1/2}} \right\} \arcsin \left\{ \left(1 - \frac{\pi\varepsilon^2}{4\tau} \right)^{1/2} \right\}.$$

В структуре гетерогенных материалов, какими являются ТС и ПСТМ, имеются фазы с локальными теплофизическими свойствами, вследствие чего фронт теплового поля распространяется преимущественно по фазам с высокой теплопроводностью. В зависимости от случайного расположения таких фаз, фронт теплового поля в гетерогенных материалах характеризуется сложным фрактальным характером, а уравнение теплопроводности имеет вид дифференциального уравнения в дробных производных [8]:

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \tilde{k} \partial^{1+\nu} T(x,t) / \partial x^{1+\nu},$$

где T – температура; t – время; x – координата; \tilde{k} – коэффициент теплопроводности, зависящий от фрактальной размерности фронта теплового поля D_Φ ($\tilde{k} = a^2/\tau$, a – масштаб, $\tau = 2D_\Phi$ – критический индекс аномальной диффузии); $\nu = (2D_\Phi - 1)$ – порядок дробной гильдеровской производной.

В [9] для определения коэффициентов тепло- и температуропроводности (λ' , ω') с учетом фрактального характера гетерогенной структуры материала предложены зависимости

$$\lambda' = \frac{\lambda_0}{\delta^{1-D_\Phi}}; \quad \omega' = \frac{\omega_0}{L^{1-D_\Phi}},$$

где λ_0 , ω_0 – коэффициенты тепло- и температуропроводности аналогичного по химическому составу однородного материала соответственно; D_Φ – фрактальная размерность фронта теплового поля в материале заготовки; δ – характерный размер ячейки, используемой для определения фрактальной размерности; $L \approx 0,04$ – длина участка предфрактала третьего поколения.

В общем виде решение приведенных выше уравнений позволяет определить скорость перемещения фронта теплового поля вдоль обрабатываемой поверхности.

Для проверки адекватности теоретических положений проведены исследования влияния скорости рабочей подачи s на глубину реза h , полученного способами ЛР, ЛРО и ЛСР (рис. 4). При этом можно заключить, что применение хладагента повышает глубину реза и препятствует растрескиванию образца; струйное охлаждение при ЛРО является менее энергоемким по сравнению с ЛСР, однако обуславливает появление значительного числа дефектов на поверхности реза и кромках заготовки.

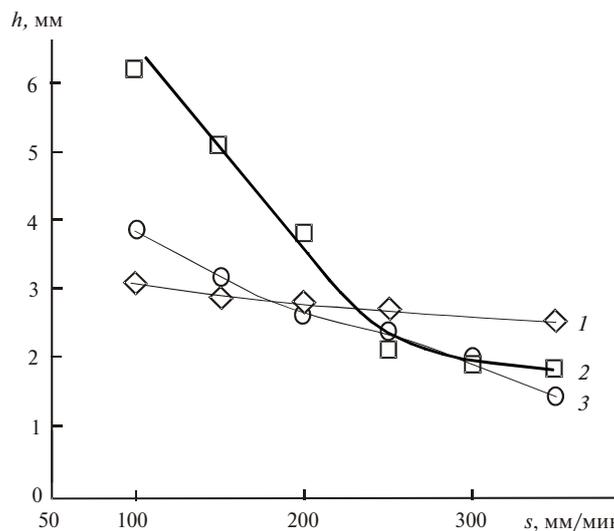


Рис. 4. Зависимость глубины канавки в заготовке из ПСТМ от скорости подачи: 1 – ЛР; 2 – ЛРО; 3 – ЛСР.

Производительность ЛРО и ЛСР, выраженные через величину объема материала, удаленного в единицу времени, отличаются в среднем в 2–3 раза. Это объясняется тем, что при ЛСР охлаждение поверхности происходит более интенсивно, следовательно, разрушение материала локализуется в меньших объемах.

При ЛРО и ЛСР на поверхности реза получена шероховатость $Ra \approx 6,3$ мкм, что объясняется неоднородностью материала и турбулентностью струи как хладагента поверхности. На рис. 5 представлено распределение скоростей движения микроплощадок разрушения, полученное на основании приведенных выше зависимостей, и 3D-изображение неровностей поверхности, созданное на основе обработки данных микроскопических исследований поверхности дна реза.

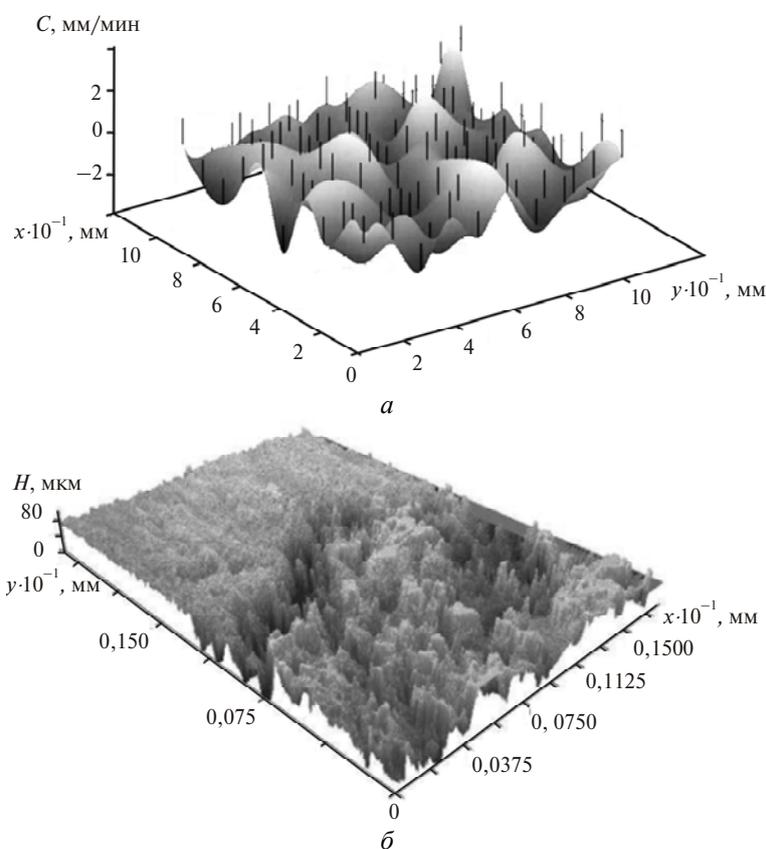


Рис. 5. Распределение скоростей движения микроплощадок разрушения (а) и 3D-изображение неровностей поверхности дна реза на заготовке из ПСТМ (б) при ЛСР.

Увеличение глубины реза по сравнению с расчетной на 15–20 % можно объяснить действием воды-хладагента, которая не только охлаждает поверхности реза, но и создает своеобразную преломляющую фокусирующую систему – дополнительное “полупрозрачное зеркало”, которое препятствует рассеиванию излучения и ведет к росту поглощающей способности материала заготовки. Можно предположить, что вода, диссоциировав на H^+ и OH^- , при воздействии концентрированного источника тепла принимает участие в

химических превращениях и способствует зарождению низкотемпературной плазмы в зоне обработки.

Детальное изучение микроснимков поверхности реза на заготовке как со стороны падения луча, так и с противоположной стороны показало, что поверхность реза неоднородна по структуре, а также по наличию дефектов (рис. 6) – в области кромки со стороны действия лазерного луча наблюдается термическая деструкция поверхностного слоя заготовки.

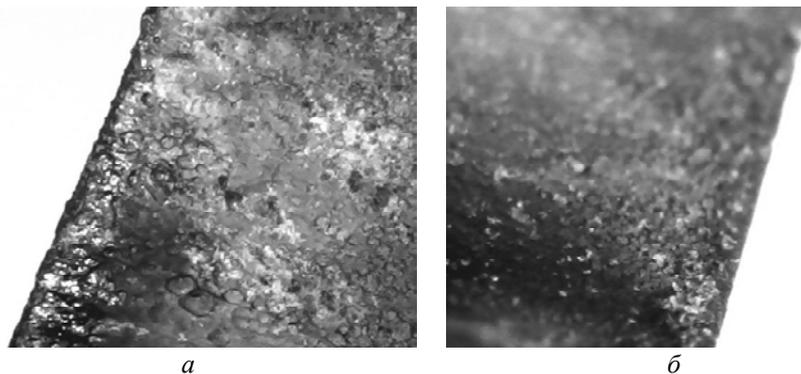


Рис. 6. Поверхность реза после ЛСР: верхняя (а) и нижняя (б) кромки.

Таким образом, использование в качестве хладагента воды, подаваемой в зону лазерного воздействия под низким давлением, позволяет значительно усилить эффект резки, обеспечивает более качественный рез и кромку со стороны выхода луча, уменьшает толщину слоя термической деструкции.

ЛСР предполагает наличие в установке для обработки специальной лазерно-струйной головки и подачи жидкости в зону обработки под высоким давлением, с фокусировкой луча лазера в определенном сечении.

При ЛСР заготовка воспринимает одновременно (или практически одновременно, если речь идет об использовании импульсного лазера) два воздействия, вызывающие разрушение материала – термическое и гидродинамическое. Суммарная мощность воздействий выражается как

$$A_v = n\rho S \frac{d\bar{z}_1}{dt} + 0,5\rho z^2 F \frac{d\bar{z}_2}{dt},$$

где F – площадь сечения струи; z – скорость струи; \bar{z}_1, \bar{z}_2 – глубина проникновения потока под действием лазерного излучения и гидродинамического воздействия соответственно.

Первое слагаемое уравнения обусловлено лазерным излучением, равномерно распределенным по поверхности площадью S , второе слагаемое – гидродинамическим воздействием струи, приложенным к поверхности площадью F .

Часть материала заготовки, попадая в зону действия луча, расплавляется и испаряется в образованной парогазовой полости, причем на последнее расходуется значительная доля мощности излучения. Частицы КНБ, воспринимая тепло от ванны расплава, нагреваются, возможно, до температуры перекристаллизации, и давлением парогазовой составляющей выталкиваются из ванны расплава. Регулируя частоту следования импульсов и их длительность, можно достичь того, что струйный поток будет обеспечивать практически мгновенный теплоотвод, исключая распространения тепла за пределы ванны

расплава. Такая циклическая резка осуществляется всякий раз, когда наступает пауза в действии лазера, а поток смыкает парогазовую полость.

Работа внешних источников энергии определяется как

$$A_v = n\rho S \frac{d\bar{z}_1}{dt} + 0,5\rho z^2 F \frac{d\bar{z}_2}{dt} - h\rho S \frac{d(\delta - \bar{z}_1)}{dt} - \theta\rho S \frac{d\bar{z}_3}{dt} + c\rho S \frac{d\bar{z}_3}{dt},$$

где θ – удельная теплота плавления связующего обрабатываемого материала; \bar{z}_3 – линейный размер ванны расплава с частицами КНБ; c – удельная приведенная теплоемкость в ванне расплава.

Для упруго-пластического тела работа внутренних сил выразится следующим образом:

$$A_b = \sigma_s [S(d\bar{z} + d(\delta - \bar{z})) + Fd\bar{z}]^{0,5} (z_1\dot{\epsilon}_1^2 + z_{12}\dot{\epsilon}_1\dot{\epsilon}_2 + z_2\dot{\epsilon}_2^2)^{0,5},$$

где σ_s – предел текучести тела; $(z_1\dot{\epsilon}_1^2 + z_{12}\dot{\epsilon}_1\dot{\epsilon}_2 + z_2\dot{\epsilon}_2^2)$ – объем зоны деформации; z_1, z_2 – координаты фронта ванны расплава и поверхности под высокоскоростной струей.

Сила сопротивления материала действию потока жидкости определяется по зависимости

$$F = 2\pi \int_0^{y(t)} f[y(t) - z] f'[y(t) - z] \rho_1 dz,$$

где ρ_1 – плотность расплава, а учитывая, что при погружении дозвуковой струи в расплав сила сопротивления не зависит от числа Маха, давление в момент удара струи по поверхности ванны расплава составляет

$$p = \frac{\rho_2 \dot{z}_0(t) C_0}{1 + \sqrt{\frac{\rho_1 E (1 - \mu)}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}}},$$

где ρ_1, E, μ – плотность, модуль упругости и вязкость жидкости в ванне расплава соответственно; ρ_2, C_0 – плотность и скорость звука натекающей жидкости соответственно; $\dot{z}_0(t)$ – скорость жидкости в струе в момент удара.

При воздействии струи жидкости на расплав происходит его практически мгновенное охлаждение со скоростью, близкой к скорости звука в материале. Частицы КНБ, которые за это время не достигли края ванны расплава и которые не были унесены за ее пределы, создают на поверхности некоторый уплотненный барьер. Энергия струи W при этом расходуется на отвод тепла из зоны расплава, на деформацию микрообъема материала и на явления в зоне сдвигов на грани тела и ванны расплава. Приняв, что дополнительная потеря кинетической энергии, вызванная воздействием сдвига, равна G , баланс энергии определится как

$$0,5m_c \dot{z}_0^2 - Y + G + 0,5m_c \dot{z}^2 + 0,5m_0 \dot{z}^2 = 0,$$

где \dot{z} – скорость разрушения материала заготовки; Y – использованная энергия, определяемая разницей кинетических энергий струи до и после момента контакта

$$Y = 0,5 \left(\frac{m_0}{m_0 + m_c} \right) m_c \dot{z}_0^2,$$

m_c – масса потока за срезом сопла; m_0 – масса разрушенного материала заготовки, представляющая собой, прежде всего, массу унесенных за пределы ванны расплава частиц КНБ.

Учитывая, что эффективная динамическая скорость при сдвиге практически постоянна до наступления “адиабатического” процесса скольжения, уравнение количества движения для процесса разрушения микрообъема заготовки струей запишется в виде

$$\frac{d}{dt} [(m_c g + \gamma_1 \delta S) z] = -g L \delta \tau_s,$$

где S, L – площадь и длина среза; γ_1 – удельный вес материала заготовки; δ – толщина заготовки; g – ускорение свободного падения; $m_c g$ – вес струи, проникающей в заготовку.

После интегрирования уравнения с момента $t = 0$ до момента прохождения струей всего поперечного сечения заготовки, получим уравнение движения фронта реза:

$$\frac{d}{dz} [0,5(m_c g + \gamma_1 \delta S) z^2] = -g l (\delta + z' - z),$$

где z' – глубина начального внедрения струи.

Приведенные зависимости позволяют оценить усредненную скорость $\frac{dz}{dt}$ внедрения струи в заготовку.

Сравнение образцов, полученных ЛРО и ЛСР, показывает, что последний способ максимально локализует зону термического воздействия, в то время как охлаждения поверхности заготовки в первом случае явно недостаточно (рис. 7).

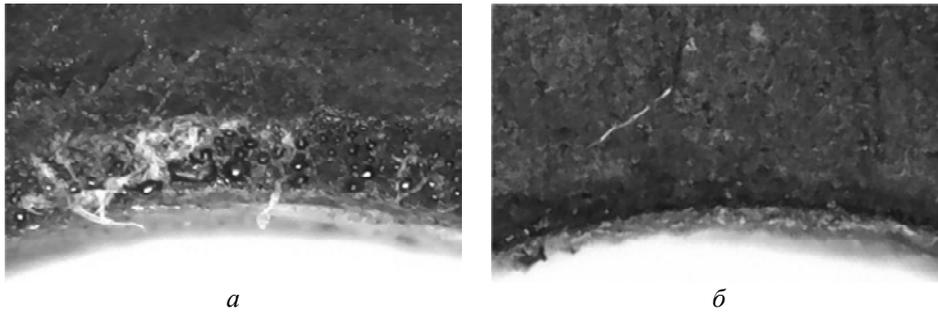


Рис. 7. Кромки резов (скорость подачи – 300 мм/мин) на заготовке из ПСТМ, полученные при ЛРО (частота импульсов – 75 Гц) (а) и ЛСР (частота импульсов – 100 Гц) (б).

При ЛСР толщина слоя термической деструкции составляет до 0,06 мм, в то время как при ЛРО формируется дефектный слой толщиной 0,10–0,55 мм и на обработанной поверхности со стороны действия лазерного луча наблюдается зона оплавления.

Сравнение качества и производительности обработки твердого сплава и сверхтвердого материала приведено в таблице.

ВЫВОДЫ

Сравнение особенностей выполнения резов на заготовках из ТС и ПСТМ различными методами позволяет сделать следующие выводы:

Параметры качества обработки материалов разными методами

Метод реза	Скорость подачи, мм/мин	Средняя глубина реза за проход, мм	Ширина реза, мм	Толщина слоя термодеструкции, мм	Шероховатость поверхности Ra , мкм	
ГАР	500	ТС	0,03–0,05	1,28–1,35	–	12,5
		ПСТМ		1,75–2,15*		
ЛР	300	ТС	4,5	0,20–0,25	0,2–0,8	6,3
		ПСТМ	3			
ЛРО		ТС	6,4	0,08–0,12	0,10–0,55	3,2–6,3
		ПСТМ	5,9			
ЛСР		ТС	3,5	0,15	< 0,06	2,5–3,2
		ПСТМ	1,75			

* Скол.

– ГАР характеризуется практически полным отсутствием остаточных напряжений, скрытых трещин и поверхностных дефектов в заготовке, однако имеет невысокую производительность и формирует широкий рез, сравнимый с диаметром D_k канала используемой калибрующей трубки, причем $h = 1,25–1,7D_k$. Существует критическая глубина реза, превышение которой практически исключает выполнение процесса резки. При обработке заготовки толщиной до 8–10 мм многопроходная резка позволяет с удовлетворительным качеством формировать поверхность любой кривизны.

– ЛР с продувкой зоны обработки газом позволяет получать рез 0,18–0,20 мм при скоростях рабочей подачи до 300 мм/мин. В поверхностном слое заготовки наблюдается термическая деструкция, которая распространяется на 0,2–0,8 мм от линии реза.

– ЛРО при тех же режимах позволяет увеличить глубину реза на 50–70 %, при этом зона термического влияния уменьшается до 0,10–0,55 мм, а ширина реза составляет 0,08–0,12 мм.

– ЛСР имеет меньшую по сравнению с ЛРО производительность и позволяет при тех же скоростях контурной подачи и мощности подводимой энергии получать рез 0,3–0,5 глубины ЛРО, однако ширина зоны термической деструкции не превышает 0,06 мм.

– ЛРО и ЛСР обеспечивают на обработанной поверхности шероховатость $Ra = 3,2–6,3$ мкм.

Анализ представленных выше результатов исследований методов обработки, основанных на одновременном действии теплового и механическо-гидродинамического воздействий, показывает возможность эффективной резки заготовок из ТС и ПСТМ.

Наведено результати досліджень гідроабразивного, лазерного, лазерного з охолодженням рідиною і лазерно-струменевого різання заготовок із твердого сплаву та полікристалічного надтвердого матеріалу на основі кубічного нітриду бору. Показано, що гідроабразивна різка практично не призводить до появи на обробленій поверхні шару термічної деструкції, при лазерному різанні формується дефектний шар товщиною

до 0,8 мм, який вдається зменшити до 0,10–0,55 мм, виконуючи лазерне різання з охолодженням зони різання водою, одночасно підвищивши глибину різання на 50–70 %, лазерно-струменево різання забезпечує мінімальну ширину різа, ті величину зони термічної деградації не більше за 0,06 мм при шорсткості поверхні до $Ra = 3,2\text{--}6,3$ мкм. Однак останній спосіб обробки є найменш продуктивним.

Ключевые слова: твердий сплав, надтвердий матеріал, гідроабразивне, лазерне, лазерно-струменево різання.

The results of study of water jet, laser cutting with a purge gas, a laser cooling liquid jet and water jet guided laser of carbide and super hard material based on cubic boron nitride giving in the article. It is shown that the water jet practically leads to the appearance of the treated surface of the layer of thermal degradation, is formed by laser cutting a defective layer thickness up to 0,8 mm, which may be reduced to 0,10–0,55 mm in the implementation of laser water-cooled cutting, while increasing cutting depth of 50–70 %. Laser-jet cutting allows to obtain both the minimum cutting width and a small area of thermal destruction (less than 0,06 mm) with a surface roughness $Ra = 3,2\text{--}6,3$.

Keywords: hard alloys, superhard materials, water jet, laser, laser-jet cutting.

1. 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
2. Саленко О. Ф., Хорольська М. С. Підвищення опору руйнування калібрувальної трубки гідроабразивних пристроїв // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2014. – № 6. – С. 18–22.
3. Fedotyev A., Fedotyeva L. The prospects of carboranes waste utilization as wearpro of coverings // Известия на Технически университет Габрово. – 2010. – 39. – С. 30–33.
4. Головка Л. Ф., Гончарук А. А., Кагляк А. Д. Влияние лазерного нагрева на прочность кубического нитрида бора при статическом нагружении // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 1/6. – С. 3–10.
5. Schulz Niessen W., M., Eppelt U., Kowalick K. Simulation of laser cutting // The Theory of Laser: Mat. Proc. – John Dowden. Springer pb., 2009. – N 119. – P. 21–69.
6. Коваленко В. С., Лавринович А. В. Лазерная обработка керамических материалов. – К.: Техніка, 1991. – 119 с.
7. Гиндин П. Д. Математическая модель термораскалывания хрупких анизотропных материалов // Поверхность. – 2010. – № 1. – С. 14–18.
8. Иванова В. С., Баланкин А. С., Бунин И. Ж., Оксогоев А. А. Синергетика и фракталы в материаловедении. – М.: Наука, 1994. – 384 с.
9. Klimenko S. A., Mel'niichuk Yu. A., Vstovskii G. V. Interreation 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.

Кременчугский национальный ун-т
им. Михаила Остроградского
Ин-т сверхтвердых материалов
им. В. Н. Бакуля НАН Украины

Поступила 27.11.14