

З. И. Колупаева, канд. физ.-мат. наук, Р. М. Стрельчук,
М. Д. Узунян, д-р техн. наук, Харьков, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ВЗАИМОСВЯЗИ ОСТАТОЧНЫХ МАКРОНАПРЯЖЕНИЙ И ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ИНСТРУМЕНТОВ ИЗ НАНОСТРУКТУРНОГО ТВЕРДОГО СПЛАВА «ВОЛКАР» ПОСЛЕ АЛМАЗНО-ИСКРОВОГО ШЛИФОВАНИЯ

Представлено результати досліджень взаємозв'язку залишкової макронапруги і працездатності інструментів з наноструктурного твердого сплаву після алмазно-іскрового шліфування. Показано, що більшим значенням напруги стискування відповідає менша сумарна технологічна собівартість обробки.

Представлены результаты исследований взаимосвязи остаточных макронапряжений и работоспособности инструментов из наноструктурного твердого сплава после алмазно-искрового шлифования. Показано, что большим значениям напряжений сжатия соответствует меньшая суммарная технологическая себестоимость обработки.

The results of investigations of correlation between residual macrostress and working capacity of tools from nanostructured hard alloy after a diamond-spark grinding are presented. It is shown that the more value of compressive stress, the less value of total technological cost.

В настоящее время перспективы развития высоких технологий связаны с одним из основных направлений в этой области – нанотехнологиями, которые занимаются созданиями наноструктур. Расширение областей применения этих технологий является важным вкладом в становлении нового технологического уклада, под которым следует понимать совокупность технологий, определяющих общий уровень экономики.

В связи с этим разработка и создание новых инструментальных материалов, а также поиск эффективных методов их использования (наноинженерия) является одним из факторов, способствующих эффективной обработке современных конструкционных материалов.

Именно поэтому во всем мире резко увеличивается производство тонкодисперсных твердых сплавов. В соответствии с современной классификацией в зависимости от величины зерна карбидной фазы, тонкодисперсные твердые сплавы подразделяются на субмикронные с размером зерна 0,5–1,2 мкм, ультрадисперсные – 0,2–0,5 мкм и наноразмерные – менее 0,2 мкм; при этом задача повышения качества твердых сплавов решается в основном путем наноструктурирования.

В настоящее время при разработке новых инструментальных материалов основное внимание уделяется созданию нанокompозитов на основе карбидов с металлами – связками, например WC/Co, которые значительно превосходят по прочности, износостойкости, ударной вязкости и другим физико-

механическим свойствам аналогичные материалы с традиционной структурой. Эти материалы получают механическим перемешиванием соответствующих порошков с последующим холодным прессованием и затем спеканием. Сложностью этой технологии и ее недостатком является механическое перемешивание ультрадисперсных порошков карбида вольфрама и кобальта, что не позволяет получать достаточно надежную степень однородности, а в спеченных твердых сплавах не обеспечивается наноразмер зерен [1]. Кроме того, при обработке с высокими скоростями температура в зоне резания может достигать 800–1000°C; такой уровень температур резания способствует размягчению кобальтовой связки и как следствие, уменьшению твердости инструментального материала и снижению износостойкости инструмента.

Представляет интерес разработанный на основе монокарбида вольфрама новый наноструктурный твердый сплав «ВолКар». Особенностью этого материала является то, что в его составе нет металла–связки; исходным материалом до спекания по специальной технологии (малое время и сравнительно невысокая температура спекания) является порошок WC с размерами зерен 40–70 нм [2]. По классификации наноматериалов по форме и химическому составу твердый сплав марки «ВолКар» можно отнести к следующим группам: по расположению кристаллитов и границ раздела – к четвертой группе, т.е. к равноосным, а по химическому составу – к первой группе, к наноматериалам с одинаковым химическим составом кристаллитов и границ раздела [3].

Рассматриваемый материал перспективен для применения в режущих инструментах при высокоскоростной обработке различных труднообрабатываемых закаленных сталей и сплавов, и в некоторых случаях может заменить дорогостоящий инструмент из кубического нитрида бора; его физико-механические свойства представлены в таблице [4].

Таблица – Основные физико-механические свойства пластин из «ВолКар»

Твердость, <i>HRA</i>	95...97
Твердость <i>HV</i> , ГПа	23...25
Плотность, мг/м	14,5
Прочность при сжатии, МПа	2600...2800
Прочность при изгибе ($T = 20...900^{\circ}\text{C}$), МПа	600...800
Теплопроводность, Вт/мК	
при 22°C	20
при 400°C	30
Трещиностойкость K_{Ic} , МПа· м ^{-1/2}	8,5...12

Формообразование рабочих поверхностей режущих инструментов из сплава «ВолКар» можно реализовать только в процессе шлифования.

Несомненным является тот факт, что существует связь между эксплуатационными характеристиками и физико-механическим состоянием рабочих поверхностей инструмента. Поэтому изучение состояния поверхностного слоя инструмента из твердого сплава марки «ВолКар» и его стойкостных характеристик после алмазно-искрового шлифования представляется весьма актуальным и явилось целью данной работы.

Состояние поверхностного слоя изучалось в пластинах «ВолКар» в исходном состоянии после спекания и полирования, и после алмазно-искрового шлифования при нормальном давлении 0,4 и 1,2 МПа и скорости резания 25 м/с.

Алмазно-искровое шлифование (АИШ) образцов проводилось с обратной полярностью (круг – анод, режущая пластина – катод) на специально модернизированном универсально-заточном станке модели 3Д642Е торцом алмазного круга 12А2-45°АС6100/80М1-01-4; источником питания являлся специальный генератор импульсов; электрические режимы составляли: величина технологического тока $I_{cp} = 5$ А, частота электроимпульсов $f = 22$ кГц, скважность $n_{скв} = 2$.

Модельные образцы подвергались рентгеновскому исследованию на дифрактометре ДРОН 2.0 в фильтрованном излучении железного анода. Дифрактограммы регистрировались поточечно через $0,1^\circ$ с экспозицией в каждой точке $10''$. Размер областей когерентного рассеяния оценивался по уширению линии (001) по формуле Селякова–Шеррера. Анализ напряженного состояния проводился с помощью $\sin^2\psi$ -метода. Для съемок было выбрана линия (112) на угле $2\theta \approx 145^\circ$. Для каждого образца было проведена перпендикулярная съемка и наклонные съемки при $\psi = \pm 30^\circ$ и $\psi = \pm 50^\circ$. Уровень напряжений определяли по формуле:

$$\sigma = \frac{E}{1+\mu} \cdot \frac{d_\psi - d_\perp}{d_\perp} \cdot \frac{1}{\sin^2\psi}, \quad (1)$$

где E – модуль нормальной упругости; μ – коэффициент Пуассона; d_ψ , d_\perp – межплоскостные расстояния, измеренные под углом и по нормали к поверхности образца; ψ – угол между нормалью к поверхности образца и соответствующей нормалью к отражающим плоскостям.

В расчетах приняты макроскопические значения упругих постоянных: $E = 720$ ГПа, $\mu = 0,18$.

Кроме того, для исследования износостойкости при тех же условиях шлифования были изготовлены резцы.

Эксперименты по определению износостойкости резцов, характеризуемой длиной пути резания (L) до принятого критерия затупления по задней поверхности ($h_3=0,4$ мм), проводились на токарно-винторезном станке 16К20; обрабатывалась закаленная сталь ХВГ (HRC_3 55...58) без

охлаждения резцами со следующими геометрическими параметрами: $\gamma = -5^\circ$; $\alpha = 8^\circ$; $\lambda = 0^\circ$; $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 15^\circ$.

Поскольку для каждой пары контактирующих инструментального и обрабатываемого материалов существует оптимальное значение температур и скорости резания, при которой работоспособность режущего инструмента реализуется наиболее полно [5, 6], была установлена оптимальная скорость резания, при которой проводились стойкостные испытания, она составила $V = 110$ м/мин, при этом $S = 0,075$ мм/об, $t = 0,2$ мм.

Для характеристики состояния поверхностного слоя проводился качественный фазовый анализ, оценивался размер областей когерентного рассеивания и уровень (величина и знак) остаточных макронапряжений.

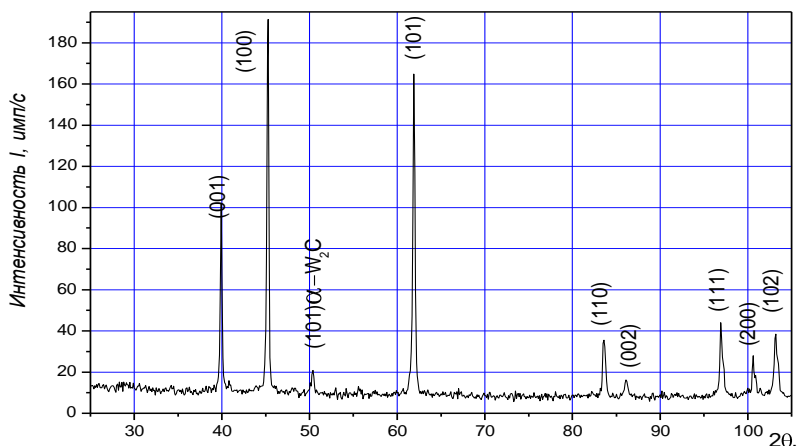


Рисунок 1 – Дифрактограмма исходного образца «ВолКар»

На рис. 1 приведена дифрактограмма исходного образца «ВолКар». Как и ожидалось, основной фазой является WC. Кроме WC, выявляется небольшое количество α -W₂C, о чем сигнализирует появление линии (101) на угле $2\theta \approx 50^\circ$.

По уширению дифракционных линий на малых углах по формуле Селякова–Шеррера можно оценить размеры областей когерентного рассеивания (ОКР):

$$L_{\text{окр}} = \frac{\lambda}{b \cos \theta}, \quad (2)$$

где $\lambda = 1,93728 \text{ \AA}$, $\theta \approx 22,65^\circ$ – линия (100), b – уширение линии (100).

Оказалось, что самые большие размеры областей когерентного рассеивания характерны для исходного образца – 600 \AA , после щадящего режима шлифования ($P = 0,4$ МПа) размеры ОКР существенно меньше –

150 А°, а после более жесткого ($P = 1,2$ МПа) несколько увеличиваются и составляют 200 А°.

На рис. 2 приведены $\sin^2\psi$ – графики исследованных образцов.

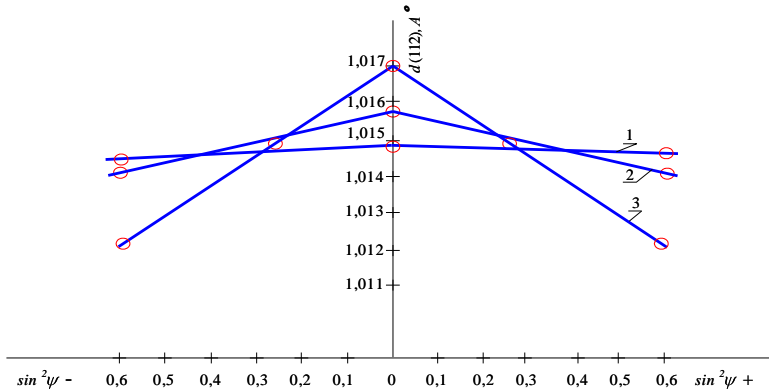


Рисунок 2 – $\sin^2\psi$ – графики образцов «ВолКар»:

1 – исходное состояние; 2 – после АИШ при $P = 1,2$ МПа; 3 – после АИШ при $P = 0,4$ МПа

Представленные графики позволяют оценить уровень деформации, а также знак и величину остаточных макронапряжений. Для исходного образца $\sin^2\psi$ -график представляет собой практически прямую линию параллельную оси $\sin^2\psi$, что свидетельствует об отсутствии макронапряжений в исследованных образцах после спекания. Те небольшие деформации ($\varepsilon = 0,2 \cdot 10^{-3}$) и остаточные сжимающие макронапряжения ($\sigma = -0,22$ ГПа) по-видимому вызваны полированием. После щадящего шлифования ($P = 0,4$ МПа) выявляемые деформации существенно выше ($\varepsilon = 6 \cdot 10^{-3}$), оценка уровня остаточных сжимающих напряжений дает значение $\sigma = -3,8$ ГПа. В образце после жесткого шлифования ($P = 1,2$ МПа) деформация $\varepsilon = 2 \cdot 10^{-3}$, а $\sigma = -1,2$ ГПа. Снижение уровня остаточных макронапряжений при жестких режимах шлифования можно объяснить более высоким уровнем развивающихся в зоне резания температур. Об этом свидетельствует и увеличение размеров ОКР.

Таким образом, в исследованных модельных образцах после шлифования при разных режимах наблюдается измельчение элементов структуры и формирования остаточных сжимающих напряжений, причем при щадящем режиме шлифования их уровень гораздо выше, чем при жестком. Учитывая это обстоятельство, можно предположить, что благоприятные условия взаимодействия рабочей поверхности алмазного круга со сплавом «ВолКар» могут быть обеспечены при более щадящих режимах шлифования

(меньшие значения нормального давления или поперечной подачи), т.е. при меньшей производительности; при этом удельная себестоимость шлифования ($C_{ш}$) будет больше. Однако следует отметить что удельная себестоимость шлифования и заточки не отражает качественное состояние изделий и инструмента в реальных условиях эксплуатации. Поэтому более важным представляется обеспечение условиями шлифования высокой износостойкости инструментов, что будет способствовать меньшей суммарной технологической себестоимости, и это является главной характеристикой надежности для потребителя; т.е. появляется возможность стоимостной оценки качества.

Изучение износостойкости резцов показало, что резцы, изготовленные АИШ при щадящем режиме имеют износостойкость на 25 % больше ($L = 1350$ м), чем при жестком режиме ($L = 1000$ м).

Следовательно, проблему оценки качественного результата шлифования следует рассматривать не только при изготовлении изделий и инструментов, но и в процессе их реальной эксплуатации [7], что важно с позиций привлекательности для потребителя.

Несмотря на то, что удельная себестоимость собственно шлифования при щадящих режимах обработки больше (меньше производительность), интегральным показателям качества следует признать суммарную технологическую себестоимость (C_T , коп/мин), которая включает не только удельную себестоимость шлифования, но и себестоимость механической обработки. Она учитывает стойкость инструмента, характеризующуюся длиной пути резания в метрах (L) до принятого критерия износа по его задней поверхности. Таким образом, фактически оценивается надежность инструмента в стоимостном выражении.

Технологическая себестоимость рассчитывалась по известной методике [8] и составляет:

$$C_T = 37,2 + \frac{466,05 + 0,16C_{ш} V}{4L}, \quad (3)$$

где $C_{ш}$ – удельная себестоимость шлифования (заточки), коп/см³; L – длина пути резания, м; которая рассчитывалась по формуле:

$$L = \frac{\pi dl}{1000S}, \quad (4)$$

где d – диаметр заготовки, мм; l – длина заготовки, мм; S – подача, мм/об.

На рис. 3 приведена сравнительная диаграмма значений остаточных макронапряжений, длины пути резания и суммарной технологической себестоимости.

Анализ представленных результатов показывает, что работоспособность шлифованных инструментов зависит от возникающих в поверхностном слое остаточных макронапряжений. Большим значениям макронапряжений сжатия

(σ) соответствуют более высокие значения длины пути резания (L) и меньшая суммарная технологическая себестоимость обработки (C_T).

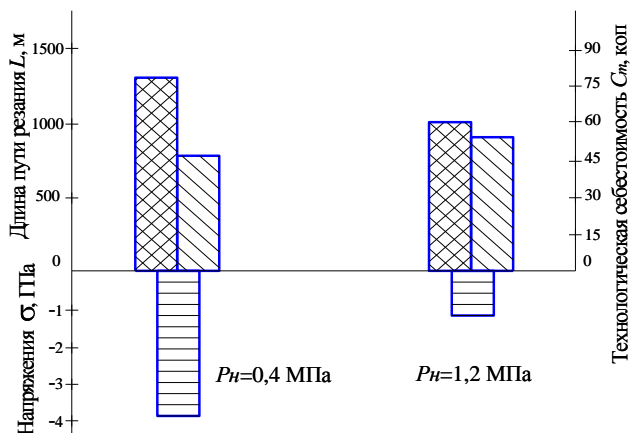


Рисунок 3 – Сравнительная диаграмма значений остаточных макронапряжений, длины пути резания и суммарной технологической себестоимости:

□ – σ , ▨ – L , ▩ – C_T ,

круг 12A2-45°AC6100/80 M1-01-4; $V = 25$ м/с; обрабатываемый материал «ВолКар»

Таким образом, можно считать установленной взаимосвязь остаточных макронапряжений сжатия в рассматриваемом наноструктурном твердом сплаве и работоспособности изготовленных из него инструментов.

Список использованных источников: 1. Боровский Г.В. Инструментальное производство в России / Г.В. Боровский. – М.: «ВНИИинструмент», 2008. – 160 с. 2. Геворкян Э.С. Горячее прессование нанопорошков монокарбида вольфрама при нагревании электрическим током / Э. С. Геворкян, Л. А. Тимофеева, В. А. Чижикала, П. С. Кислый // Наноструктурное материаловедение. – Киев, 2007. – №1. – с. 103–108. 3. Лякишев Н. П. Нанокристаллические структуры – новое направление развития конструкционных материалов / Н. П. Лякишев // Вестник Российской Академии наук. – 2003.– Т. 73. – №5. 4. Геворкян Э. С. Плотные и пористые конструкционные материалы из нано и субмикронных порошков WC, Al₂O₃ и SiC полифункционального назначения. Дисс. докт. техн. наук / Э. С. Геворкян – Харьков, 2007 – 276 с. 5. Макаров А. Д. Оптимизация процессов резания / А. Д. Макаров – М.: Машиностроение, 1976. – 178 с. 6. Зубарь В. П. Особенности применения лезвийного инструмента из сверхтвердых материалов / В. П. Зубарь // Современные технологии в машиностроении, 2006. – Т 1. – С. 99–116. 7. Харрингтон Дж. Х. Управление качеством в американских корпорациях / Дж. Х. Харрингтон – М.: Экономика, 1990. – 271 с. 8. Крючков В. Я. Технологическая себестоимость обработки инструментами из безвольфрамовых твердых сплавов / В. Я. Крючков, М. Д. Узунян // Сб. докл. всесоюз. науч.-техн. конф.: Перспективы развития резания конструкционных материалов. – М., 1980. – С. 226–232.

Поступила в редколлегию 21.04.2010