

*Е.С. Киселев*, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения»

*М.В. Назаров*, магистрант кафедры «Технология машиностроения»

*Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск (Россия)*

*Ключевые слова:* твердый сплав; твердосплавные стержни; остаточные напряжения; поверхностный слой; полусинтетическая термопара; регрессионная модель.

*Аннотация:* Рассмотрены вопросы обеспечения качества твердосплавных инструментов и деталей при их изготовлении путем рационального использования энергии ультразвуковых колебаний. Общеизвестно, что одним из основных показателей качества поверхностного слоя деталей или инструментов является отсутствие растягивающих остаточных напряжений. Особенно это важно для инструментов, используемых для высокоскоростной обработки заготовок из алюминиевых сплавов, которые не подвергаются нанесению износостойких покрытий, а также для буровых коронок и различных твердосплавных деталей, находящих все большее применение в современных машинах и механизмах. Как правило, заготовки для их изготовления на заключительных стадиях технологического процесса подвергаются шлифованию, после которого неизбежно возникновение растягивающих остаточных напряжений. Для их релаксации в действующем производстве используют термическую обработку или естественное старение, что увеличивает производственный цикл и себестоимость изготовления.

Авторами предложено для этой цели использовать энергию ультразвукового поля, для чего были разработаны оригинальные установки и проведены исследования. В ходе исследований получены регрессионные зависимости остаточных напряжений от параметров теплосилового напряженности (составляющих сил резания и контактной температуры в зоне плоского алмазного шлифования образцов из ультрамелкодисперсного твердого сплава) и элементов режима обработки (скорости продольной подачи стола и глубины резания). Остаточные напряжения контролировали с помощью отечественного рефрактометра «Рикор-4». В процессе обработки осуществляли оценку и структурно-фазовым превращениям в поверхностном слое (с помощью рентгеновского измерительного комплекса «Рикор-7»). Результаты исследований позволили установить скорость ультразвуковой релаксации и установить элементы ее режима.

Все более широкое распространение в России и мире в металлообработке и горной промышленности получает использование современных конструкций твердосплавных инструментов и деталей, отличающихся повышенной прочностью, а также жесткостью и износостойкостью. Такие инструменты и детали изготавливают из твердосплавных стержней диаметром 0,5...50 и более мм. Современные твердые сплавы характеризуются малым размером зерна  $D_{WC}$  карбидов вольфрама (WC):  $D_{WC}=0,2...0,8$  мкм. С уменьшением размера зерна WC, увеличиваются твердость и прочность и уменьшаются вязкость разрушения и теплопроводность [1–4]. При этом меньшая теплопроводность вызывает и меньшее сопротивление тепловому удару [5; 6].

До недавнего времени цельные твердосплавные осевые инструменты и детали в нашей стране изготавливали на универсальном оборудовании за 10–12 операций [7].

Обеспечение заданных эксплуатационных характеристик при изготовлении подобных деталей и инструментов, в которых возникающие из-за теплосилового напряженности поверхностного слоя технологические остаточные напряжения (как правило, растягивающие) способны вызывать существенные качественные изменения, представляется сложной технологической задачей [8; 9].

На практике это выливается в необходимость существенно снижать элементы режима, а в некоторых случаях даже подбирать опытным путем последовательность изготовления. Обработку твердосплавных заготовок деталей в настоящее время чаще всего ведут на современных многоцелевых обрабатывающих центрах, заготовок инструментов – на пятикоординатных шлифовально-заточных станках с ЧПУ, для которых подобные потери производительности недопустимы [7].

Наличие растягивающих технологических остаточных напряжений (ТОН) в поверхностном слое деталей из твердых сплавов способно в значительной мере уменьшить усталостную прочность. В твердосплавных режущих инструментах и в буровых коронках – приводит к снижению периода стойкости и износостойкости. Последнее особенно актуально при снятии припусков с заготовок из алюминиевых сплавов, режущие инструменты для обработки которых не подвергаются нанесению износостойких покрытий [1; 7]. Имеется предположение, что наличие в поверхностном слое ТОН любого знака способствует отслаиванию износостойких покрытий.

Общеизвестно, что существенно снизить теплосиловую напряженность в зоне контакта режущего инструмента с заготовкой (а следовательно, уменьшить вероятность возникновения нежелательных остаточных напряжений) можно наложением ультразвуковых колебаний (УЗК) на элементы технологической системы и смазочно-охлаждающую жидкость [10–15].

Однако уменьшать ТОН можно как сразу после окончательной обработки заготовки, обычно являющейся наиболее теплонапряженной, так и в ходе всего технологического процесса изготовления детали. Традиционно используемые методы связаны либо с большими временными (естественная релаксация), энергетическими (термическая релаксация) и материальными затратами (экспериментальный подбор элементов режима и последовательности обработки), либо с существенными трудностями при обработке маложестких заготовок (поверхностно-пластическое деформирование). Весьма перспективным является использование для релаксации ТОН энергии ультразвукового (УЗ) поля [15–20].

До настоящего времени весьма сложным является определение рационального места расположения операции релаксации ТОН в технологическом процессе (ТП) изготовления деталей [12]. Во многом это связано с необходимостью учета явления технологической наследственности (ТН). Последнее оказывает существенное влияние на уровень ТОН в готовых деталях. Отсутствие теории, практических рекомендаций и методик учета явления ТН затрудняет разработку оптимальных ТП изготовления деталей из труднообрабатываемых материалов с заданными эксплуатационными свойствами. Решение данных проблем позволяет повысить точность обработки, уменьшить длительность технологического цикла и снизить себестоимость изготовления деталей.

Выяснение, насколько значимы для практики высказанные предположения, было целью выполненных экспериментальных исследований. Исследования выполняли в два этапа.

На первом этапе выявляли взаимосвязь между элементами режима окончательной обработки (алмазное шлифование кругом АСР100/20-61-00-61,0 с окружной скоростью  $V_k=24$  м/с и поперечной подачей стола 2 мм/мин на плоскошлифовальном станке 3Е710) и технологическими остаточными напряжениями в поверхностном слое образцов из однокарбидного твердого сплава RX10-NG (WC 90 %, Co 10 %,  $D_{wc}=0,5...0,8$  мкм,

изготовитель – фирма Hartmetall Carduro Radiament, Швейцария, Чехия). Шлифование осуществляли с подачи к зоне контакта круга с заготовкой 10 %-ной водной синтетической смазочно-охлаждающей жидкости Simtech 500 (Нидерланды) с расходом 10 л/мин. Технологические остаточные напряжения  $\sigma$  МПа, определяли с помощью рентгеновского измерительного комплекса «Рикор-4» (Россия). В процессе исследований контролировали контактную температуру в зоне шлифования  $T_k$  °С, методом полудикусовой термомпары. С устройства для измерения контактной температуры сигнал поступал на аналогово-цифровой преобразователь АЦП/ЦАП 16/16 SigmaUSB с усилителем, передающим его на персональный компьютер. Затем при помощи специального программного обеспечения ZetLab информация обрабатывалась и выводилась на экран монитора в графическом и численном видах. Аналогичным образом с помощью динамометра УДМ-100 производили измерения составляющих силы резания  $P_y$  и  $P_z$ .

Исследования проводили по многофакторному плану. Условия проведения и результаты исследований приведены в табл. 1, 2.

Регрессионные зависимости в кодированном виде могут быть представлены следующим образом:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3.$$

Таблица 1. Условия проведения и результаты исследований

№ п/п	Скорость продольной подачи $V_s$ , мм/мин	Глубина резания $t$ , мм	$P_y$ , Н	$P_z$ , Н	$T_k$ , °С	$\sigma$ , МПа
1.1	750	0,01	58,48	12,75	686	591
1.2	750	0,01	58,38	13,10	677	580
1.3	750	0,01	58,46	13,14	681	569
2.1	750	0,02	72,17	22,12	777	673
2.2	750	0,02	72,13	22,18	775	681
2.3	750	0,02	72,18	22,04	780	679
3.1	950	0,01	62,81	13,32	732	645
3.2	950	0,01	63,07	13,28	727	649
3.3	950	0,01	62,86	13,24	728	648
4.1	950	0,02	76,03	24,06	909	729
4.2	950	0,02	75,96	24,02	903	716
4.3	950	0,02	76,26	24,14	915	740

Таблица 2. Результаты исследований эффективности УЗ релаксации ТОН в поверхностных слоях твердосплавных заготовок

№ сер.	Исходный уровень ТОН, МПа	Время воздействия УЗК, с	Уровень ТОН после воздействия, МПа
1.1	582	10	554
1.2	561	30	488
1.3	579	90	392
2.1	678	10	657
2.2	672	30	591
2.3	669	90	501
3.1	730	10	679
3.2	717	30	589
3.3	725	90	456

По результатам выполненных исследований в натуральном виде для определения технологических остаточных напряжений получена зависимость от контактной температуры и составляющих сил шлифования:

$$\sigma = -287,22 + 14,37P_y - 12,50P_z + 0,15T_k.$$

При этом коэффициент корреляции составил  $K_k = 0,97456$ , а среднеквадратический коэффициент корреляции  $K_{ск} = 0,971517$ .

На практике удобнее пользоваться зависимостью от элементов режима шлифования:

$$\sigma = 273,59 + 8933,35t + 0,30V_s.$$

В этом случае получены следующие значения коэффициентов корреляции:  $K_k = 0,9888$ ;  $K_{ск} = 0,9778$ .

Как следует из результатов выполненных исследований, в поверхностном слое заготовок из твердого сплава даже при алмазном шлифовании на щадящих режимах обработки возникают технологические остаточные напряжения растяжения. В реальном производстве изготовления режущих твердосплавных инструментов (например, на станках WALTER HELITONIC POWER), буровых коронок и твердосплавных деталей, как показывает выполненный анализ существующих технологий на отечественных предприятиях ОАО «НПК ХАЛТЕК» (Ульяновск) и ОАО «ВОЛГОбУР-МАШ» (Самара), используемые элементы режима обработки отличаются существенно большей теплосиловой напряженностью. Поэтому существует большая вероятность, что в новых инструментах и деталях из твердых сплавов в поверхностном слое имеются растягивающие остаточные напряжения. Следует учитывать, что временная релаксация ТОН маловероятна вследствие высокой температуры плавления твердых сплавов, а термическая связана с большими экономическими затратами. Поэтому на втором этапе исследований после обработки заготовок на плоскошлифовальном станке их подвергали ультразвуковой релаксации.

УЗ релаксация осуществлялась на установке, созданной на базе плоскошлифовального станка. Схема установки представлена на рис. 1.

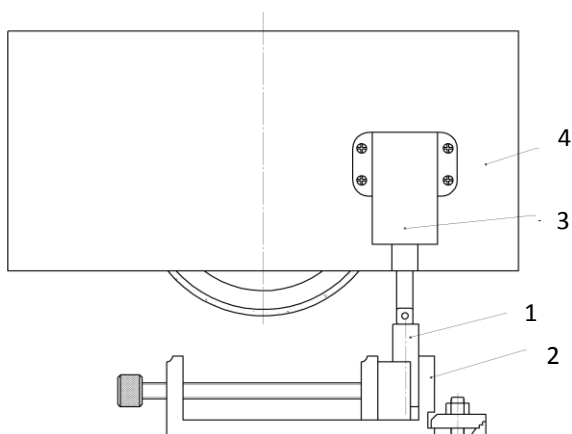


Рис. 1. Схема установки для УЗ релаксации ТОН в ПС заготовки: 1 – заготовка, 2 – приспособление, 3 – УЗ волновод, 4 – кожух шлифовального круга

Во время исследований УЗ волновод подводился до касания к обработанной поверхности заготовки с помощью микрометрической системы станка. Для экспериментов использовали образцы со средним исходным уровнем ТОН в 574 (серия 1), 671 (серия 2) и 724 (серия 3) МПа. Время воздействия УЗ колебаний составляло 10, 30 и 90 секунд.

Анализ полученных результатов показал, что использование энергии УЗ поля для релаксации ТОН в заготовках из твердых сплавов эффективно уже при времени «озвучивания» в 10 секунд: при скорости релаксации от 2 до 5 МПа/с уровень ТОН в поверхностном слое заготовок уменьшается до 7% от первоначальной величины. С увеличением времени «озвучивания» до 1,5 минуты эффективность УЗ релаксации возрастает до 37%. При этом отмечается, что эффективность тем выше, чем больше исходный уровень ТОН.

Таким образом, выполненные исследования показывают, что важным резервом повышения качества твердосплавных деталей и инструментов является включение в техпроцесс их изготовления операции УЗ релаксации технологических остаточных напряжений.

Исследования проведены в рамках выполнения гранта РФФИ по проекту 14-08-01059.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фальковский В.А., Боровский В.Г. Твердые сплавы на основе карбида вольфрама с нанозернистой и ультрамелкой структурой // Цветные металлы. 2010. № 5. С. 106–112.
2. Lu F.X., Tang W.Z., Tong Y.M., Miao J.Q., Li C.M., Chen G.C. Novel pretreatment of hard metal substrate for better performance of diamond coated cutting tools // Diamond and Related Materials. 2006. Vol. 15. № 11-12. P. 2039–3045.
3. Фальковский В.А., Фальковский Ф.И., Панов В.С. Нано- и ультрадисперсные твердые сплавы // Цветные металлы. 2007. № 10. С. 85–91.
4. Гусев А., Курлов А. Твердые сплавы сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2005. № 2. С. 42–45.
5. Кирсанов С.В. Цельные твердосплавные осевые режущие инструменты // Приложение к журналу «Справочник. Инженерный журнал». 2012. № 3. С. 2–23.
6. Фальковский В.А., Клячко Л.Н. Твердые сплавы. М.: Руда и металлы, 2005. 416 с.
7. Боровский Г.В., Григорьев С.Н., Маслов А.Р. Справочник инструментальщика. М.: Машиностроение, 2005. 464 с.
8. Guo G., Malkin S. Heat transfer in grinding // Journal of material Processing and Manufacturing Science. 1990. Vol. 1. P. 16–27.
9. Малыгин Г.А. Процессы самоорганизации дислокаций и пластичность кристаллов // Успехи физических наук. 1999. Т. 169. № 9. С. 1008–1010.
10. Кумабэ Д. Вибрационное резание. М.: Машиностроение, 1985. 424 с.
11. Киселев Е.С. Повышение эффективности механической обработки путем использования энергии маломощных модулированных ультразвуковых колебаний // Научные технологии механической обработки в машиностроении. 2013. № 6. С. 3–13.

12. Киселев Е.С., Ковальногов В.Н. Механическая обработка заготовок в условиях критического тепло-массопереноса // Избранные труды Российской школы по проблемам науки и технологий. М.: РАН, 2008. 250 с.
13. Киселев Е.С. Интенсификация процессов механической обработки рациональным использованием энергии ультразвукового поля. Ульяновск: УлГТУ, 2003. 186 с.
14. Киселев Е.С., Малышев В.И., Ковальногов В.Н. Новые ультразвуковые технологии изготовления деталей машин. Тольятти: ТГУ, 2015. 312 с.
15. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и в технике. М.: Иностранная литература, 1957. 726 с.
16. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / под ред. И.П. Голяминой. М.: Советская энциклопедия, 1979. 400 с.
17. Селиванов А.С., Малышев В.И. Комплекс математических моделей дислокационно-энергетического состояния поверхностного слоя при ультразвуковом выглаживании // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2011. № 2. С. 68–73.
18. Зарембо Л.Н., Красильников В.А. Введение в нелинейную акустику. М.: Наука, 1966. 519 с.
19. Вагапов И.К., Ганиев М.М., Шинкарев А.С. Теоретическое и экспериментальное исследование динамики ультразвуковой вибрационной системы с промежуточным бойком // Известия вузов. Машиностроение. 2008. № 5. С. 3–24.
20. Ганиев М.М., Вагапов И.К., Шинкарев А.С. Экспериментальное исследование ударной обработки ультразвуковым инструментом с промежуточным бойком // Известия вузов. Авиационная техника. 2008. № 4. С. 41–44.
7. Borovskiy G.V., Grigoryev S.N., Maslov A.R. *Spravochnik instrumentalschchika* [Reference book of tool-maker]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2005, 464 p.
8. Guo G., Malkin S. Heat transfer in grinding. *Journal of material Processing and Manufacturing Science*, 1990, vol. 1, pp. 16–27.
9. Malygin G.A. Dislocation self-organization processes and crystal plasticity. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 1999, vol. 169, no. 9, pp. 1008–1010.
10. Kumabe D. *Vebratsionnoe rezanie* [Vibration cutting]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1985, 424 p.
11. Kiselev E.S. Improvement of mechanical processing efficiency using the energy of low-power modular ultrasonic fluctuations. *Naukoemkie tekhnologii mekhanicheskoy obrabotki v mashinostroenii*, 2013, no. 6, pp. 3–13.
12. Kiselev E.S., Kovalnogov V.N. Mechanical processing of blank parts in the critical heat and mass transfer. *Izbrannye trudy Rossiyskoy shkoly po problemam nauki i tekhnologii*. Moscow, RAN publ., 2008, 250 p.
13. Kiselev E.S. *Intensifikatsiya protsessov mekhanicheskoy obrabotki ratsionalnim ispolzovaniem energii ultrazvukovogo polya* [Intensification of mechanical processing using the rational application of ultrasonic field power]. Ulyanovsk, UIGTU publ., 2003, 186 p.
14. Kiselev E.S., Malyshev V.I., Kovalnogov V.N. *Novye ultrazvukovye tekhnologii izgotovleniya detaley mashin* [New ultrasonic technologies of machine parts production]. Tolyatti, TGU publ., 2015, 312 p.
15. Bergman L. *Ultrazvuk i ego primeneniye v nauke i v tekhnike* [Ultrasound and its application in science and engineering]. Moscow, Inostrannaya literature publ., 1957, 726 p.
16. Golyamina I.P., ed. *Ultrazvuk. Malenkaya entsiklopediya* [Ultrasound. Small encyclopedia]. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya publ., 1979, 400 p.
17. Selivanov A.S., Malyshev V.I. Complex of mathematical models of the dislocation structure and power condition of surface layers at ultrasonic peening. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2011, no. 2, pp. 68–73.
18. Zarembo L.N., Krasilnikov V.A. *Vvedeniye v nelineynuyu akustiku* [Introduction to non-linear acoustics]. Moscow, Nauka publ., 1966, 519 p.
19. Vagapov I.K., Ganiev M.M., Shinkarev A.S. Theoretical and experimental research of dynamics of ultrasonic vibration anvil-block system. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*, 2008, no. 5, pp. 3–24.
20. Ganiev M.M., Vagapov I.K., Shinkarev A.S. Experimental studies of the impulsive ultrasonic machining by a tool with an intermediate striker. *Russian Aeronautics*. 2008, vol. 51, no. 4. pp. 407–413.

## REFERENCES

1. Falkovskiy V.A., Borovskiy V.G. Hard alloys based on tungsten carbide with nanograined and ultra-fine structure. *Tsvetnye metally*, 2010, no. 5, pp. 106–112.
2. Lu F.X., Tang W.Z., Tong Y.M., Miao J.Q., Li C.M., Chen G.C. Novel pretreatment of hard metal substrate for better performance of diamond coated cutting tools. *Diamond and Related Materials*, 2006, vol. 15, no. 11-12, pp. 2039–3045.
3. Falkovskiy V.A., Falkovskiy F.I., Panov V.S. Nano- and ultradisperse hard alloys. *Tsvetnye metally*, 2007, no. 10, pp. 85–91.
4. Gusev A., Kurlov A. Hard alloys today and tomorrow. *Metally Evrazii*, 2005, no. 2, pp. 42–45.
5. Kirsanov S.V. Solid hard-alloy rotary cutting tools. *Prilozheniye k zhurnalu "Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal"*, 2012, no. 3, pp. 2–23.
6. Falkovskiy V.A., Klyachko L.N. *Tverdye splavy* [Hard alloys]. Moscow, Ruda i metally publ., 2005, 416 p.

**THE IMPROVEMENT OF QUALITY OF HARD-ALLOY TOOLS AND PARTS BY MEANS OF CREATION OF SPECIFIED LEVEL OF RESIDUAL STRESS IN THE SURFACE LAYER**

© 2015

*E.S. Kiselyov*, Doctor of Engineering, Full Professor, professor of the department «Engineering technology»

*M.V. Nazarov*, graduate student of the department «Engineering technology»

*Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk (Russia)*

*Keywords:* hard alloy; hard-alloy cores; residual stresses; surface layer; semi-artificial thermocouple; regression model.

*Abstract:* The article covers the issues of ensuring quality of hard-alloy tools and parts when producing them by means of rational use of ultrasonic fluctuations energy. It is well-known that one of the key indicators of quality of the surface layer of parts or tools is the lack of stretching residual stresses. It is especially important for the tools used for high-speed processing of aluminum alloys blank parts which are not exposed to the drawing of wear resistant coatings, and also for the crown bits and various hard-alloy parts which are widely used in modern machines and mechanisms. As a rule, the blank parts to be produced are processed by grinding at final stages of technological process, after which the stretching residual stresses are inevitable. For their relaxation, thermal treatment or natural aging is used in the production that increases the production cycle and the cost of production. For this purpose, the authors offered to use the ultrasonic field energy; in this connection, special installations were developed and the researches were conducted. During the research, the regression dependences of residual stresses on the parameters of thermal power intensity (the components of cutting forces and the contact temperature in the zone of flat diamond grinding of samples made of ultra finely-divided hard alloy) and the elements of processing mode (the longitudinal conveying speed and the cutting depth) were received. The residual stresses were controlled by means of domestic “Rikor-4” refractometer. During processing, the authors carried out the assessment and the structural phase changes in the surface (using the x-ray measuring “Rikor-7” complex). The results of researches allowed to determine the velocity of ultrasonic relaxation and the elements of its mode.