

УДК 621.922.04

**А. А. СИМОНОВА**, канд. техн. наук, доц. КрНУ, Кременчуг

## **ОБРАБАТЫВАЕМОСТЬ РЕЗАНИЕМ ТИТАНОВОГО СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СПЛАВА ВТ6**

Приведены результаты экспериментальных исследований и методика определения показателей обрабатываемости (коэффициент усадки стружки, угол наклона условной плоскости сдвига, силовые характеристики процесса резания и коэффициент трения). Представленные данные показывают улучшение обрабатываемости титанового сплава в субмикроструктурном состоянии, однако температурно-силовые явления процесса резания влияют на изменение структуры и, соответственно на показатели обрабатываемости.

**Ключевые слова:** обрабатываемость, субмикроструктурный титановый сплав, коэффициент усадки стружки, сила резания.

**Введение.** В настоящее время нарабатан большой экспериментальный материал по определению режимов резания при обработке деталей из различных материалов, который положен в основу справочных данных. Однако, по-прежнему, проблемой в современном машиностроении остается определение режимов максимальной обрабатываемости новых материалов. К таким материалам можно отнести металлы и сплавы с нано– и субмикроструктурной структурой.

Количество исследовательских работ в области обработки материалов резанием, направленных на определение обрабатываемости материалов, является значительным и неуклонно растет. Это обусловлено разработкой и внедрением большого количества новых материалов во всех областях промышленности. К таким материалам можно отнести металлы и сплавы с нано– и субмикроструктурной структурой, полученные методом интенсивной пластической деформации.

**Анализ последних исследований и литературы.** В работах ряда ученых [1, 2, 3] отмечены отличия в обрабатываемости металлов с нано– и субмикроструктурной структурой. В работе [1] изучена обрабатываемость чистого титана Grade 2 Ti, полученного равноканальным угловым прессованием в сравнении с крупнокристаллическим титаном и титановым сплавом Ti6-4.

Исследования показали, что изменения физико-механических свойств в субмикроструктурном титане приводит к увеличению значений сил резания, в первую очередь главной составляющей силы резания в сравнении с титановым сплавом. Это явление вызывает изменения в процессе стружкообразования и влияет на износ режущего инструмента, а также качество обработанной поверхности. Такие же тенденции наблюдаются при обработке субмикроструктурной меди [2].

**Цель статьи.** Исследование обрабатываемости титановых сплавов с субмикроструктурной структурой по виду и коэффициенту усадки стружки, углу наклона условной плоскости сдвига, а также изменению силы резания и коэффициента трения в процессе механической обработки.

**Постановка проблемы.** Большинство новых металлов обладают улучшенными механическими и физическими характеристиками. Это влечет за собой ухудшение обрабатываемости металлов резанием. В связи с этим возникает необходимость создания новых методов обработки, прогрессивных инструментальных материалов и улучшенных конструкций металлорежущего инструмента. Но и в этом случае невозможно обойтись без определения условий максимальной обрабатываемости металлов. Без проведения таких исследований обычно допускается назначение заведомо низких режимов резания, что влечет за собой снижение производительности и повышение себестоимости обработки.

**Материалы исследований.** В качестве исследуемого материала выбран титановый сплав ВТ6, который широко используется в автомобиле- и авиастроении. Для получения титанового сплава в СМК состоянии использован метод интенсивной пластической деформации, представляющий собой всестороннюю ковку, которая включает в себя многократное повторение определенной последовательности простых операций свободной ковки – осадки и протяжки [4]. Процесс всесторонней ковки выполнялся при нагреве заготовки до 773 К в индукционной печи. После четырех проходов, включающих в себя операции осадки – протяжки, полученные поковки охлаждали в сухом песке.

Исследуемые образцы титанового сплава получены на предприятии ПАО КрКЗ, г. Кременчуг (Украина), по ранее рассмотренной технологии.

Титановый сплав с исходной структурой имеет форму поставки – горячекатаный пруток диаметром 31,6 мм, образец диаметром 16 мм после всестороннейковки.

Экспериментальные исследования обрабатываемости проводили на образцах с крупнокристаллической (КК) и субмикрокристаллической (СМК) структурой.

Для исследования влияния механической обработки использовались различные режимы резания:  $V = 30 - 100$  м/мин,  $s = 0,05 \div 0,2$  мм/об. Использовалась постоянная глубина резания  $t = 0,5$  мм. Процесс резания осуществлялся без охлаждения.

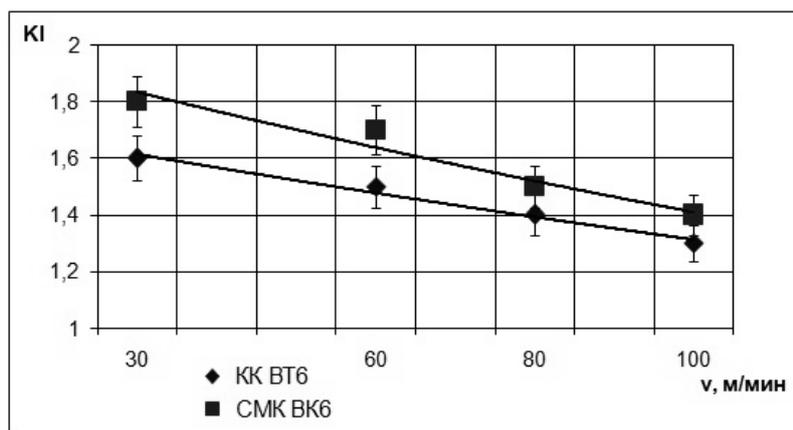
В качестве режущего инструмента использовался токарный проходной резец со сменными многогранными твердосплавными пластинами CNMG 120404-MF1, TS2000 фирмы SECO. Геометрические параметры: передний угол –  $5^\circ$ , задний угол –  $0^\circ$ , радиус округления вершины лезвия – 0,4 мм. Эксперименты проводили на токарном станке модели H.Ernault-Somua Cholet 435.

Для определения коэффициента деформации стружки (коэффициент усадки) применен весовой метод. Длина стружки измерена с помощью гибкой проволоки, прилегающей к гладкой поверхности стружки. Вес стружки  $G$  найден взвешиванием на аналитических весах мод. Sartorius BP221S с ценой деления 0,001 г. Коэффициент усадки стружки рассчитан по формуле [5]:  $K_L = \frac{G \cdot 10^3}{L_c \cdot \rho \cdot s \cdot t}$ , где  $G$  – вес стружки, мг;  $L$  – длина стружки, мм;  $s$  – подача, мм/об;  $t$  – глубина резания, мм;  $\rho$  – удельный вес материала стружки, г/см<sup>3</sup>.

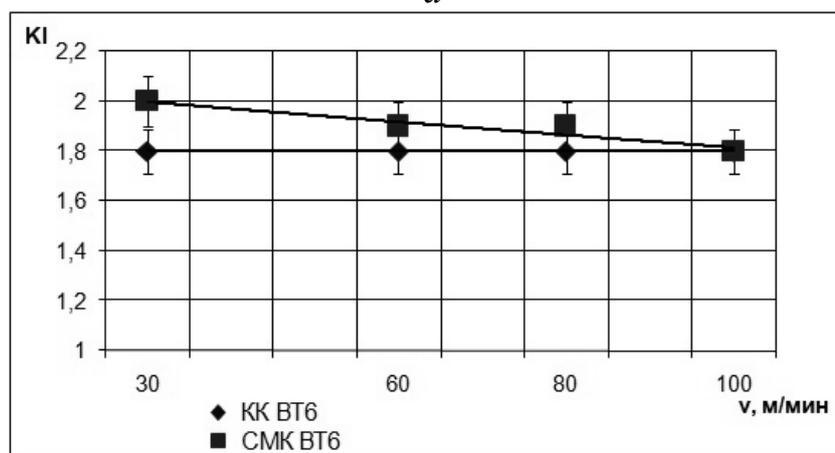
Составляющие силы резания измерялись с помощью динамометра Kistler 9257B и усилителя Kistler 5017B.

**Результаты исследований.** Комплекс характеристик, определяющих обрабатываемость, взаимосвязан с физико-механическими свойствами материала, а соответственно с его составом и структурой.

Определение обрабатываемости подразумевает установление зависимостей формы, вида и типа стружки, а также процесса стружкообразования от режимов резания, силовых зависимостей процесса резания.



*a*



*б*

Рис. 1 – Зависимости коэффициента усадки стружки титанового сплава от скорости резания:  
*a* – при  $s = 0,05$  мм/об, *б* – при  $s = 0,2$  мм/об

Основными характеристика процесса стружкообразования является коэффициент усадки стружки и угол наклона условной плоскости сдвига.

Результаты экспериментов по определению коэффициента усадки стружки  $K_L$  приведены на рис. 1.

Практически во всем исследованном диапазоне скоростей резания значение коэффициента усадки субмикроструктурного титанового сплава меньше по сравнению с крупнокристаллическим, что обусловлено некоторым уменьшением пластичности титана, полученного методом ИПД [6].

По мере увеличения скорости резания коэффициент усадки стружки уменьшается для обоих типов образцов (исходного и полученного всесторонней ковкой), что объясняется уменьшением коэффициента трения между стружкой и передней поверхностью при увеличении температуры на передней поверхности вследствие возрастания скорости резания [7].

При увеличении скорости резания от 30 до 10 м/мин степень уменьшения коэффициента усадки стружки для субмикроструктурного титанового сплава существенно меньше по сравнению с крупнокристаллическим аналогом, рис. 1. При  $V = 100$  м/мин значения  $K_L$  для обоих типов образцов практически совпадают, что может свидетельствовать об определенной стабилизации структуры, которая стремится к исходной структуре, а значит, и свойств полученного методом ИПД образца.

Механические свойства обрабатываемого материала весьма сложно и противоречиво влияют на составляющие силы резания. С одной стороны, повышение прочности и твердости обрабатываемого материала увеличивает угол сдвига, что уменьшает коэффициент усадки стружки и величину относительного сдвига. В результате этого уменьшаются работы деформации и стружкообразования и, как следствие, составляющие силы резания. С другой стороны, с повышением прочности и твердости напряжения в условной плоскости сдвига возрастают, что увеличивает работу деформации, стружкообразования и составляющие силы резания. В зависимости от того, что является преобладающим, силы резания при увеличении прочности и твердости обрабатываемого материала могут и возрастать, и уменьшаться [8].

На рис. 2 показаны гистограммы зависимости главной составляющей силы резания от скорости резания и подачи при токарной обработке титанового сплава ВТ6.

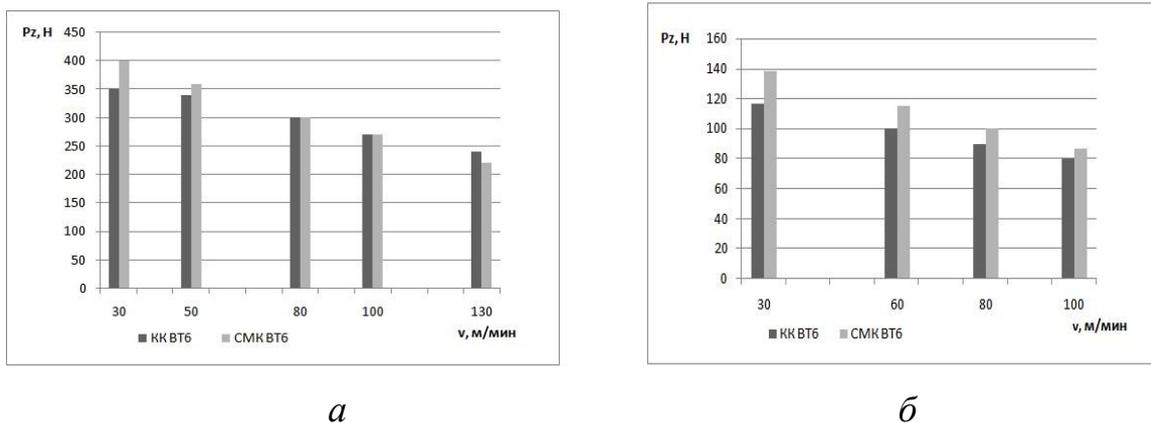


Рис. 2 – Зависимости главной составляющей силы резания титанового сплава от скорости резания: *а* – при  $s = 0,05$  мм/об, *б* – при  $s = 0,2$  мм/об

Экспериментальные данные показали, что главная составляющая силы резания  $P_z$  при обработке субмикроструктурного титанового сплава на

15÷20% выше, чем при обработке крупнокристаллического аналога с различными подачами и при глубине обработки до 0,5 мм. Увеличение силы  $P_z$  связано с увеличением твердости и прочности субмикроструктурного титана.

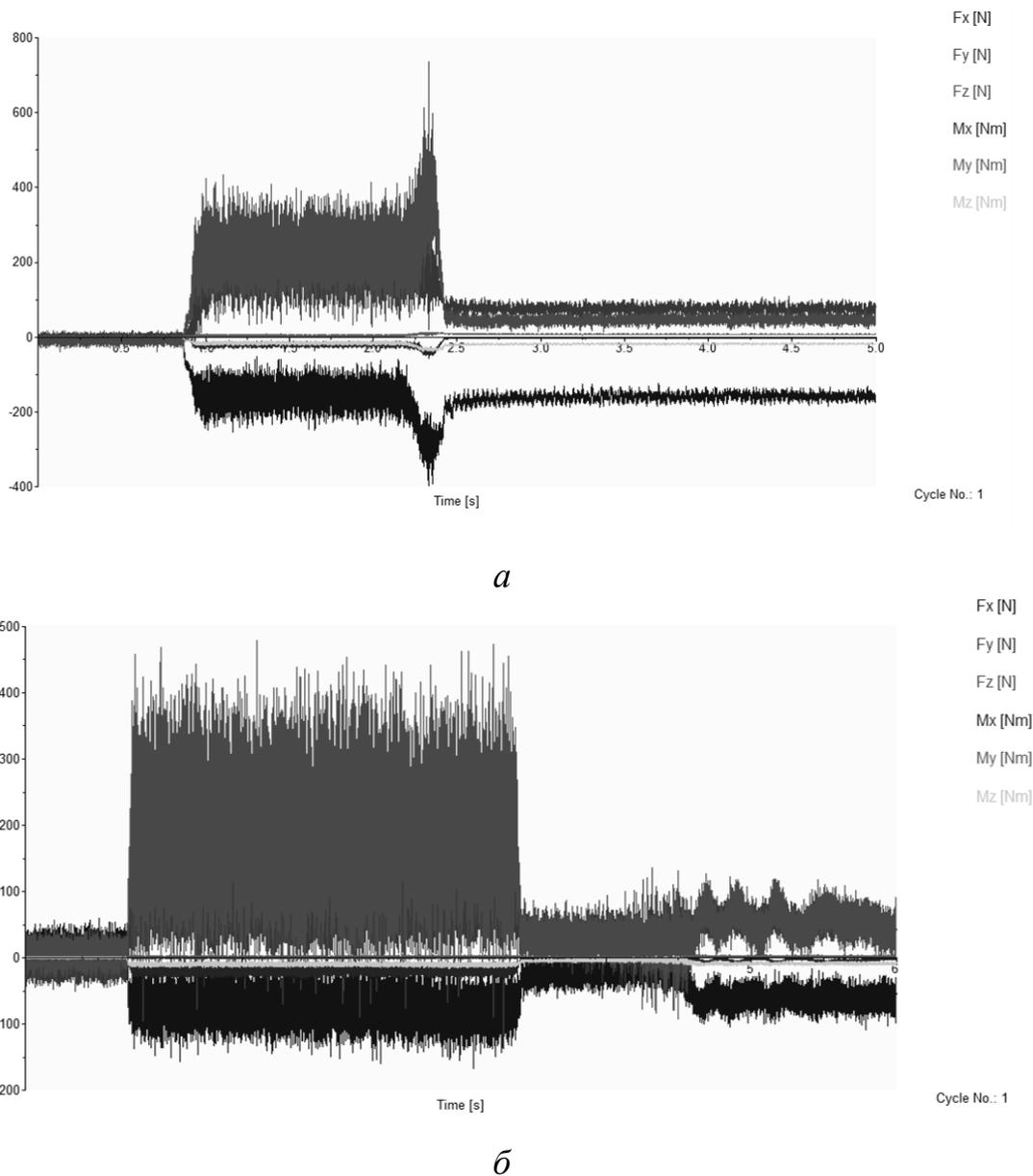


Рис. 3 – Осциллограммы составляющих силы резания ( $v = 30$  м/мин;  $s = 0,2$  мм/об;  $t = 0,5$  мм):  
*a* – КК ВТ6, *б* – СМК ВТ6

Радиальная составляющая  $P_y$  и осевая составляющая  $P_x$  при обработке субмикроструктурного титанового сплава также больше, чем для крупнокристаллического образца.

Увеличение подачи приводит к росту всех составляющих силы резания при точении образцов. При увеличении скорости резания значения

составляющих силы резания монотонно убывают, однако процесс убывания величин, составляющих силы резания при обработке субмикроструктурированного образца происходит интенсивнее, что обусловлено с более интенсивным снижением прочности титанового сплава при повышении температуры в зоне обработки.

При обработке субмикроструктурированного титана увеличиваются не только величины составляющих силы резания, но и их амплитуды. На рис. 3, приведены осциллограммы, полученные на динамометрическом стенде. Увеличение амплитуд может быть объяснено повышением прочностных характеристик металлов в субмикроструктурированном состоянии. При этом рост амплитуды приводит к возникновению автоколебаний системы и, как следствие, к ухудшению качества обработанной поверхности.

На основании экспериментально полученных данных по исследованию механики процесса резания СМК титанового сплава (коэффициент усадки стружки, составляющие силы резания), см. табл. 1, с использованием аналитических зависимостей [9, 10], проведен расчет некоторых параметров, характеризующих механику процесса резания.

Таблица 1 – Исходные данные для расчета параметров процесса резания титанового сплава ВТ6

Исходные данные	Структура титана	
	КК	СМК
Инструментальный материал	ВК6	ВК6
Главный передний угол инструмента $\gamma$ , град	5	5
Угол наклона режущей кромки $\lambda$ , град	0	0
Скорость резания $V$ , м/мин	30	30
Подача $s$ , мм/об	0,05	0,05
Глубина резания $t$ , мм	0,5	0,5
Усадка стружки $K_L$	0,6	0,5
Результирующая сила резания $R$ , Н	153	173

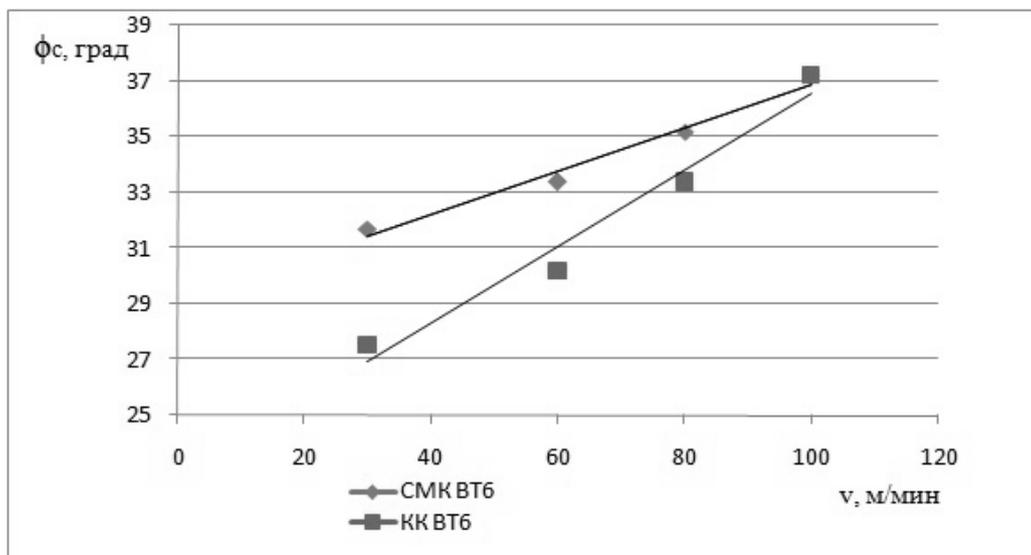
Результаты расчетов внесены в табл. 2.

Таблиця 2 – Результати расчета параметров механики резания титанового сплава ВТ6

Параметры процесса точения	Структура титанового сплава	
	КК	СМК
Угол сдвига, град	32	27
Угол трения, град	33	24
Коэффициент трения	0,65	0,46
Сила сдвига, Н	67,6	110,2
Площадь плоскости сдвига, мм <sup>2</sup>	0,29	0,28
Нормальная сила в плоскости сдвига, Н	133,8	138,2
Скорость сдвига, м/с	0,58	0,56
Сила трения, Н	83,8	70,5
Нормальная сила, Н	129,1	158,4
Скорость схода стружки, м/с	0,3	0,25

Процесс резания титанового сплава с СМК структурой можно классифицировать как косоугольное резание с образованием сливной стружки без вторичных пластических деформаций ее контактного слоя. Образование сливной стружки при непрерывном резании позволяет рассматривать процесс как стабильный, не зависящий от времени.

Большие углы сдвига при резании титановых сплавов образуются в результате пониженных пластических свойств [6]. На рис. 4 представлены зависимости изменения угла сдвига от скорости резания.

Рис. 4 – Зависимость угла сдвига от скорости резания ( $s = 0,05$  мм/об;  $t = 0,5$  мм)

По всей видимости, у СМК титанового сплава уменьшается сопротивление сдвигу в зоне стружкообразования ввиду повышения его

прочностных характеристик и снижения пластичности, что приводит к уменьшению угла сдвига ( $\Phi = 27^\circ$ ) по сравнению с КК ( $\Phi = 32^\circ$ ) при обработке со скоростью резания 30 м/мин, подачей 0,05 мм/об и глубиной резания 0,5мм.

С увеличением скорости резания угол сдвига увеличивается для всех исследований образцов. В случае высокоскоростной обработки титана и его сплавов эта тенденция показывает, что начальная фаза формирования стружки происходит аналогично. Угол сдвига приближается к  $45^\circ$ , что соответствовало бы минимальной энергией сдвига. Разнообразие форм стружки могут быть объяснены динамическими эффектами отрыва сегмента, распространения полос сдвига и образование трещин [11].

Значение силы сдвига при обработке СМК титанового сплава с различными скоростями резания выше, чем у КК образца, что можно объяснить высоким значением предела текучести СМК металлов.

Средний коэффициент трения при резании состоит из постоянной механической оставляющей  $\mu_0$  и переменной адгезионной составляющей  $\mu_A$ . Изменение коэффициента трения от скорости резания представлено на рис. 5.

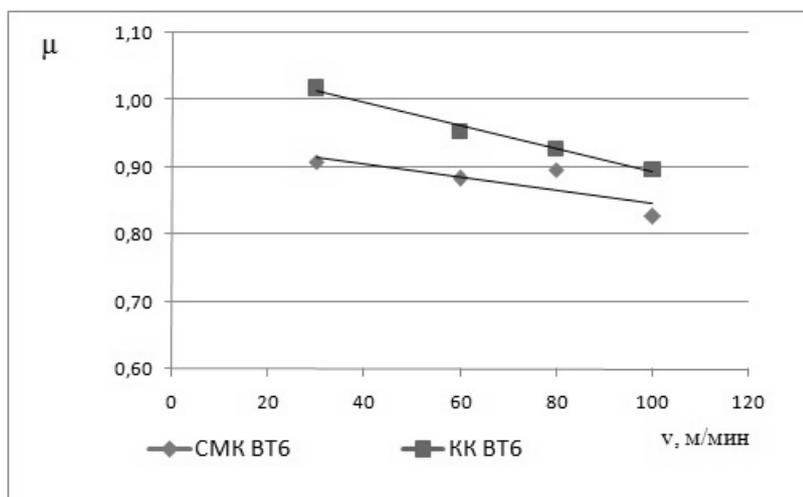


Рис. 5 – Зависимость коэффициента трения от скорости резания  
( $s = 0,05$  мм/об;  $t = 0,5$  мм)

Снижение среднего коэффициента трения при обработке СМК титанового сплава с различными скоростями резания связано с уменьшением адгезионной составляющей коэффициента трения за счет возникновения вторичных структур (оксидов титана) на поверхности трибоконтакта [12] «инструмент-заготовка». При этом количество оксидов титана увеличивается с

увеличением температуры контакта (скорости резания). Оксиды титана, выполняя роль защитной пленки, предохраняют от схватывания контактирующих поверхностей и способствуют снижению коэффициента трения [12].

**Выводы.** Представленные экспериментальные результаты косвенно показывают, что тепловые и деформационные процессы, сопровождающие процесс резания, активизируют начало рекристаллизации и рост исходного зерна в образцах с субмикроструктурной структурой, полученной ИПД. Кроме того, состояние структуры и физико-механические свойства СМК титанового сплава приводят к изменению обрабатываемости и сопровождающих процесс резания тепловых и силовых параметров обработки. Полученные результаты позволяют говорить об улучшении обрабатываемости субмикроструктурного титанового сплава ВТ6 за счет уменьшения коэффициента трения и увеличения угла сдвига. Кроме того, в соответствии с теорией вязкого разрушения уменьшение размера зерна обрабатываемого материала сопровождается уменьшением критической длины трещины, поэтому можно предположить, что процесс стружкообразования для субмикроструктурного титанового сплава начнется при меньших размерах микротрещин и повлечет за собой снижения величины работы для процесса разрушения. Для создания обобщенных закономерностей условий обрабатываемости необходимо дальнейшее изучение особенностей механики процесса резания различных марок титановых сплавов, полученных методами интенсивной пластической деформации.

**Список литературы:** 1. *Lapovok R. Machining of coarse grained and ultra fine grained titanium / R. Lapovok, A. Molotnikov, Y. Levin [and all] // J Mater Sci. – 2012. – 47. – P. 4589–4594.* 2. *Moreheada M. Machinability of ultrafine-grained copper using tungsten carbide and polycrystalline diamond tools / M. Moreheada, Y. Huang, K. Ted Hartwig // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2007. – 47. – P. 286–293.* 3. *Чертовских С.В. Обрабатываемость резанием ультрамелкозернистого титана, полученного методом равноканального углового прессования / С.В. Чертовских // Вестник машиностроения. – 2007 – №5 – С. 43–46.* 4. *Мулюков Р.Р. Деформационные методы получения, многоуровневая структура и свойства наноструктурных материалов / Р.Р. Мулюков, А.А. Назаров, Р.М. Имаев // Вопросы материаловедения. – 2008. – № 2(54). – С. 20–32.* 5. *Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. – М. : Машиностроение, 1975. – 344 с.* 6. *Мальгин Г.А. Пластичность и прочность микроструктурных и нанокристаллических материалов / Г.А. Мальгин // ФТТ. – 2007. – Т. 49, № 6. – С. 961–982.* 7. *Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов / В.Н. Подураев. – М. : Высшая школа, 1974. – 590 с.* 8. *Грановский Г.И. Резание металлов / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. – М. : Высшая школа, 1985. – 304 с.* 9. *Oxley P. Mechanics of machining. An analytical approach to assessing machinability / P. Oxley. – New York : Ellis Horwood Ltd, 1989. – 296 p.* 10. *Altintas Yu. Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machin Tool Vibrations and CNC Design / Yu. Altintas. – Cambridge : Cambridge University Press, 2000. – 350 p.*

11. Sutter G. Very high speed cutting of Ti–6Al–4V titanium alloy—change in morphology and mechanism of chip formation / G. Sutter, G. List // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. – 2013. – 66. – P. 37–43. 12. Чертовских С.В. Триботехнические характеристики ультрамелкозернистого титана и его сплавов / С.В. Чертовских. – автореферат канд. дис., Уфа : Уфа-центр, 2008. – 22 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Lapovok, R., A. Molotnikov and Y. Levin. «Machining of coarse grained and ultra fine grained titanium.» *J Mater Sci*. No. 47. 2012. 4589–4594. Print. 2. Moreheada, M., Y. Huang, K Ted Hartwigb. «Machinability of ultrafine-grained copper using tungsten carbide and polycrystalline diamond tools.» *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. No. 47. 2007. 286–293. Print. 3. Chertovskih, S. V. «Obrabatyvaemost' rezaniem ul'tramelkozernistogo titana, poluchennogo metodom ravnokanal'nogo uglovogo pressovaniya.» *Vestnik mashinostroeniya*. No. 5. 2007. 43–46. Print. 4. Muljukov, R. R., A.A. Nazarov and R.M. Imaev «Deformacionnye metody poluchenija, mnogourovnevaja struktura i svojstva nanostrukturnyh materialov.» *Voprosy materialovedeniya*. No. 2(54). 2008. 20–32. Print. 5. Bobrov, V. F. *Osnovy teorii rezaniya metallov*. Moscow: Mashinostroenie, 1975. Print. 6. Malygin, G. A «Plastichnost' i prochnost' mikrokristallicheskih i nanokristallicheskih materialov.» *FTT*. No. 6. 2007. 961–982. Print. 7. Poduraev, V. N. *Rezanie trudnoobrabatyvaemyh materialov*. Moscow: Vysshaja shkola, 1985. Print. 8. Granovskij, G. I., V. G. Granovskij. *Rezanie metallov*. Moscow: Vysshaja shkola, 1985. Print. 9. Oxley, P. *Mechanics of machining. An analytical approach to assessing machinability*. New York: Ellis Horwood Ltd, 1989. Print. 10. Altintas, Yu. *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machin Tool Vibrations and CNC Design*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. Print. 11. Sutter, G. and G. List « Very high speed cutting of Ti–6Al–4V titanium alloy—change in morphology and mechanism of chip formation.» *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. No. 66. 2013. 37–43. Print. 12. Chertovskih, S. V. *Tribotekhnicheskie harakteristiki ul'tramelkozernistogo titana i ego splavov*. Avtoreferat kand. dis. Ufa: Ufa-centr, 2008. Print.

Поступила (received) 11.10.2015

УДК 620.179.14

**Г. М. СУЧКОВ**, д-р техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»;

**Ю. В. ХОМЯК**, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»;

**С. Н. ГЛОБА**, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»;

**А. Ю. СЛОБОДЧУК**, аспирант НТУ «ХПИ»

## КОМПЬЮТЕРНЫЙ ВИХРЕТОКОВЫЙ ДЕФЕКТОСКОП ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ

Работа посвящена разработке вихретокового дефектоскопа для неразрушающего контроля металлических изделий. Описана структурная схема прибора, основой которого является микроконтроллер на базе ядра Cortex M0. В качестве управляющего микроконтроллера использована микросхема STM32F030F4P6 производства компании STMicroelectronics. Разработан макет вихретокового дефектоскопа, который состоит из электронного блока, подключаемого к персональному компьютеру через USB-разъем и вихретокового преобразователя.

**Ключевые слова:** неразрушающий контроль, вихретоковая дефектоскопия, вихретоковый преобразователь, микроконтроллер, поверхностный дефект.

**Введение.** Для контроля металлоизделий на наличие дефектов применяются различные методы и устройства [1–3]. Среди них и дефектоскопы различного типа, реализующие возможность неразрушающего контроля