

УДК 621.922

МАКРОМЕХАНІКА ПРОЦЕСА РЕЗАННЯ СУБМІКРОКРИСТАЛІЧЕСКИХ МЕТАЛЛОВ**А. А. Симонова**

Кременчугський національний університет імені Михайла Остроградського

ул. Первомайська, 20, г. Кременчуг, 39600, Україна. E-mail: NSymonova@gmail.com

Рассмотрены особенности физики процесса резания субмикроструктурированных металлов, полученных методом интенсивной пластической деформации. Представлен аналитический расчет для определения основных параметров лезвийной обработки с учетом особенностей косоугольного резания, которые позволяют выявить основные характеристики процесса стружкообразования и изучить термомеханические явления в первичной зоне сдвига. Данная аналитическая модель позволяет производить расчеты с использованием минимального количества экспериментальных величин, таких как коэффициент усадки стружки и сила резания. Установлено, что изменение структуры металла имеет неоднозначное влияние на обрабатываемость резанием. Дальнейшее исследование обрабатываемости металлов с нано- и субмикроструктурированной структурой позволит производить изделия с принципиально новыми эксплуатационными характеристиками.

Ключевые слова: субмикроструктурированные металлы, стружкообразование, обрабатываемость резанием.

МАКРОМЕХАНІКА ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ СУБМІКРОКРИСТАЛІЧНИХ МЕТАЛІВ**А. А. Симонова**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: NSymonova@gmail.com

Розглянуто особливості фізики процесу різання субмікроструктурованих металів, отриманих методом інтенсивної пластичної деформації. Представлено аналітичний розрахунок для визначення основних параметрів лезової обробки з урахуванням особливостей косокутного різання, які дозволяють виявити основні характеристики процесу стружкоутворення і вивчити термомеханічні явища в первинній зоні зсуву. Дана аналітична модель дозволяє здійснювати розрахунки з використанням мінімальної кількості експериментальних величин, таких як коефіцієнт деформації стружки та сила різання. Встановлено, що зміна структури металу має неоднозначний вплив на оброблюваність різанням. Подальше дослідження оброблюваності металів із нано- та субмікроструктурованою структурою дозволить виготовляти вироби з принципово новими експлуатаційними характеристиками.

Ключові слова: субмікроструктуровані метали, стружкоутворення, оброблюваність різанням.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Измельчение микроструктуры конструкционных сплавов до субмикроструктуры (СМК) и нанокристаллического (НК) состояния позволяет повысить их прочность, предел выносливости и износостойкость. Такие изменения в механических свойствах делают конструктивные сплавы с СМК и НК структурой перспективными для практического применения в авиа-, судостроении и медицине [1].

Получение готовых изделий из заготовок с СМК и НК структурой осуществляется с помощью механической обработки и имеет свои особенности, связанные с возникновением высоких температур в зоне резания, влияющих на интенсификацию процесса рекристаллизации и последующего роста зерна структуры и, как следствие резкое снижение физико-механических свойств материала заготовки.

Цель работы – исследование механики процесса резания технически чистого титана и меди с СМК-структурой и анализ с точки зрения применения этих материалов для изготовления изделий с высокими физико-механическими свойствами и эксплуатационными характеристиками.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Для формирования СМК структуры в заготовке был использован метод интенсивной пластической деформации (всесторонняя ковка). Исследования проводились на токарном станке с ЧПУ 16Б16Ф1С1 с использованием твердосплавных резцов ВК8 для обработки титана и ВК6 для обработки меди. Обработка образцов проводилась с постоянной глубиной резания $t = 0,5$ мм, подачей $s = 0,09 - 0,14$ мм/об при обработке титана, $s = 0,14 - 0,24$ мм/об при обработке меди. Ско-

рость резания изменялась в границах возможности станка $v = 30 \dots 160$ м/мин.

Составляющие силы резания измерялись с помощью динамометра УДМ600 с регистрацией цифровых данных в режиме реального времени LTR-U-1 MEASURING INSTRUMENT. Коэффициент деформации стружки определялся весовым методом.

Исходные данные для расчета параметров процесса резания при обработке титана ВТ1-00 с крупнокристаллической и СМК структурой приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Исходные данные для расчета параметров процесса резания титана

Исходные данные	Структура титана	
	КК	СМК
Инструментальный материал	ВК8	ВК8
Главный передний угол инструмента, γ , град	0	0
Угол наклона режущей кромки, λ , град	0	0
Скорость резания, v , м/мин	30	30
Подача, s , мм/об	0,09	0,09
Глубина резания, t , мм	0,5	0,5
Усадка стружки, r_f	1,1	0,8
Результирующая сила резания, R , Н	258	275

На основании экспериментально полученных данных по исследованию физики процесса резания СМК металлов (коэффициент усадки стружки и составляющие силы резания) на примере титана и меди по аналитическим зависимостям [2–5], прове-

ден расчет некоторых параметров, характеризующих механику процесса резания.

Процесс резания титана и меди 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.

Согласно работе [2] угол резания g_δ при косоугольном резании зависит от угла наклона режущей кромки λ и угла схода стружки Y_2 .

$$g_\delta = \arccos[\cos I \cos Y_2 \cos g_N + \sin I \sin Y_2], \quad (1)$$

где λ – угол наклона режущей кромки; Y_2 – угол схода стружки; g_N – нормальный угол резания.

Угол сдвига Φ является удобным параметром для характеристики величины и направления пластической деформации в зоне стружкообразования.

Обычно угол сдвига определяют в плоскости перпендикулярной к режущей кромке. Нормальный угол сдвига Φ_N измеряется между плоскостью сдвига и плоскостью проходящей через вновь образованную поверхность. Нормальный угол сдвига можно выразить следующим образом [3]:

$$tg\Phi_N = \frac{r_t \cos g_N}{1 - r_t \sin g_N}. \quad (2)$$

Эффективный угол сдвига можно определить из следующего уравнения [4]:

$$tg\Phi_e = \frac{r_t r_b \sin g_e}{1 - r_t r_b \sin g_e}, \quad (3)$$

где $r_t r_b = \frac{v_t}{v}$ (из условия неразрывности и несжимаемости материала).

Когда $\lambda = 0$, $g_e = g_N$, то $r_b = 1$, так что $\Phi_e = \Phi_N = \Phi$.

В случае обработки СМК титана и меди при $\lambda = 0$ воспользуемся следующей формулой для определения угла сдвига [4]:

$$\Phi = \tan^{-1} \frac{r_t \cos g}{1 - r_t \sin g}, \quad (4)$$

где r_t – коэффициент усадки стружки, $r_t = \frac{1}{K_L}$; γ – передний угол.

Скорость v_t , с которой осуществляется сдвиг по условной плоскости сдвига, можно определить, разложив вектор скорости резания на векторы v_t и v_F скоростей сдвига и трения по передней поверхности [5].

Скорость сдвига определяют по формуле

$$v_t = v \frac{\cos g}{\cos(\Phi - g)}. \quad (5)$$

Скорость схода стружки v_c по величине равна скорости трения v_F и находится по формуле

$$v_c = r_t v. \quad (6)$$

Скорость схода стружки увеличивается по мере увеличения скорости резания и уменьшения коэффициента усадки стружки [5].

Передняя поверхность инструмента действует на срезаемый слой с нормальной силой N . По закону Амонтона нормальная сила создает силу трения $F = m \cdot N$ (m – средний коэффициент трения). Сумма нормальной силы и силы трения создают силу стружкообразования. Разложив силу стружкообразования на две силы, получим: силу P_N , перпендикулярную к условной плоскости сдвига, и силу P_t , действующую вдоль плоскости сдвига. Сила P_N сжимает сдвигаемый слой, а сила P_t сдвигает его. Таким образом, сдвиговый процесс при образовании стружки вызывает сила P_t – сила сдвига [2].

$$P_t = R \cos(\Phi + b - g); \quad (7)$$

$$P_N = R \sin(\Phi + b - g), \quad (8)$$

где R – результирующая сила резания: $R = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2}$; Φ – угол сдвига; β – угол трения; γ – передний угол.

Угол b_N рассматривается как нормальный угол трения и находится из зависимости [3]:

$$tg b_N = \frac{F}{N} \cos Y_2, \quad (9)$$

где F – сила трения; N – нормальная сила.

В работах Стаблера экспериментально показано, что $Y_2 = \lambda$ [3]. Так как $\lambda = 0$, то угол трения определяем по формуле:

$$tg b = \frac{F}{N}; \quad (10)$$

$$F = \sqrt{\left[(P_x \cos I + P_z \sin I) \sin g_N + P_y \cos g_N \right]^2 + (P_x \sin I - P_z \cos I)^2} \quad (11)$$

$$\text{и } N = [P_x \cos I + P_z \sin I] \cos g_N - P_y \sin g_N. \quad (12)$$

Отсюда коэффициент трения равен

$$m = \tan b = \frac{F}{N} \text{ или}$$

$$m = \frac{\sqrt{\left[(P_x \cos I + P_z \sin I) \sin g_N + P_y \cos g_N \right]^2 + (P_x \sin I - P_z \cos I)^2}}{\left[P_x \cos I + P_z \sin I \right] \cos g_N - P_y \sin g_N} \quad (13)$$

Результаты расчета параметров механики резания титана занесены в табл. 2.

Большие углы сдвига ($\Phi = 38-55^\circ$) при резании титана образуются в результате пониженных пластических свойств титана [2]. По всей видимости, у СМК титана уменьшается сопротивление сдвигу в зоне стружкообразования в виду повышения его прочностных характеристик и снижения пластичности. Это приводит к уменьшению угла сдвига ($\Phi = 38^\circ$) по сравнению с КК титаном ($\Phi = 47^\circ$) при обработке со скоростью резания 30 м/мин, подачей 0,09 мм/об и глубиной резания 0,5 мм.

Таблиця 2 – Результати розрахунку параметрів механіки різання титана

Параметри процесу точення	№ режиму і структура титана	
	КК	СМК
Угол сдвига, град	47	38
Угол трення, град	32	28
Коефіцієнт трення	0,6	0,55
Сила сдвига, Н	55	104
Площади площини сдвига, мм ²	0,27	0,26
Нормальна сила в площині сдвига, Н	254	250
Швидкість сдвига, м/с	0,75	0,64
Сила трення, Н	218	240
Нормальна сила, Н	225	238
Швидкість сходження стружки, м/с	0,55	0,4

Значення сили сдвига при обробці СМК титана з різними швидкостями різання вище, ніж у КК титана, що можна пояснити великим межею текучості на сдвиг СМК металів.

Середній коефіцієнт трення при різанні складається з постійної механічної залишкової m_0 і змінної адгезійної складової m_A . Зниження середнього коефіцієнта трення при обробці СМК титана з різними швидкостями різання пов'язано з зменшенням адгезійної складової коефіцієнта трення за рахунок виникнення вторинних структур (оксидів титана) на поверхні трибоконтакту. При цьому, кількість оксидів титана збільшується з збільшенням температури контакту (швидкості різання). Оксиди титана, виконуючи роль захисної плівки, захищають від схваткування контактуючих

поверхностей і сприяють зниженню коефіцієнта трення [6].

Аналогічно проведені розрахунки параметрів різання для СМК міді.

Збільшення кута сдвига з 8 до 11° при обробці СМК міді порівняно з КК міддю (швидкість різання 30 м/мин, подача 0,14 мм/об) пояснюється підвищеними механічними характеристиками міді в СМК стані.

ВИВОДИ. Дослідження макромеханіки процесу різання металів з об'ємною СМК і НК структурою є важливим етапом вивчення оброблюваності нових матеріалів, що дозволило отримати необхідну інформацію про параметри обробки і встановити ступінь оброблюваності досліджуваних матеріалів.

ЛИТЕРАТУРА

1. Valiev R.Z. Nanostructuring of Metals by Several Plastic Deformation for Advanced Properties // *Nature Materials*. – 2004. – Vol. 3. – PP. 511–516.
2. Бобров Ф.В., Грановский Г.И., Зорев Н.Н. и др. Развитие науки о резании металлов. – М.: Машиностроение, 1967 – 415 с.
3. Armarego E.J.A. *Material Removal Process-An Intermediate Course*. – Melbourne: The University of Melbourne, 1993. – 250 p.
4. Oxley P. *Mechanics of machining. An analytical approach to assessing machinability*. – New York: Ellis Horwood Ltd, 1989. – 296 p.
5. Altintas Yu. *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations and CNC Design*. – Cambridge: Cambridge University Press, 2000. – 350 p.
6. Чертовских С.В. Триботехнические характеристики ультрамелкозернистого титана и его сплавов: автореферат канд. дис. – Уфа: Уфа-центр, 2008. – 22 с.

MACROMECHANIC OF SUBMICROCRYSTALLINE METAL CUTTING PROCESS

A. Symonova

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: NSymonova@gmail.com

The physics features of the cutting process of submicrocrystalline metals produced by the method of severe plastic deformation are considered. The analytical calculation for determining the main cutting parameters taking into account the features of oblique cutting is presented. These parameters allow identifying the main characteristics of the process of chip formation and studying thermomechanical phenomena in the primary shear zone. This analytical model allows making calculations using the minimum number of experimental parameters such as the chip thickness ratio and cutting force. It is found that the change in the structure of the metal has an ambiguous effect on the cutting workability. Further study of the workability of metals with nano- and submicrocrystalline structure will manufacture products with principally new in-use performances.

Key words: submicrocrystalline metal, chip formation, workability.

REFERENCES

1. Valiev R.Z. Nanostructuring of Metals by Several Plastic Deformation for Advanced Properties // *Nature Materials*. – 2004. – Vol. 3. – PP. 511–516.
2. Bobrov F.V., Granovskij G.I., Zorev N.N. et al. *The science of metal cutting*. – Moscow: Mashinostroenie, 1967 – 415 p. [in Russian]
3. Armarego E.J.A. *Material Removal Process-An Intermediate Course*. – Melbourne: The University of Melbourne, 1993. – 250 p.
4. Oxley P. *Mechanics of machining. An analytical approach to assessing machinability*. – New York: Ellis Horwood Ltd, 1989. – 296 p.
5. Altintas Yu. *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations and CNC Design*. – Cambridge: Cambridge University Press, 2000. – 350 p.
6. Chertovskih S.V. *Tribological characteristics of ultrafine titanium and its alloys: thesis of PhD*. – Ufa: Ufa-center, 2008. – 22 p. [in Russian]

Стаття надійшла 03.12.2012.

Рекомендовано до друку
д.т.н., проф. Драгобецьким В.В.