

момент времени при использовании линейных критериев. Таким образом, целесообразность использования нелинейных критериев качества, порождающих экстремали типа рассмотренных, не вызывает сомнений. В предлагаемых адаптивных

алгоритмах управления могут использоваться линейные и нелинейные критерии первого и второго порядков. При этом достаточно ограничиться нелинейными критериями второго порядка.

УДК 621.941

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ФИНИШНОМ ТОЧЕНИИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА Ti6Al4V

Фельдштейн Е., Лексыцки К.

Зеленогурский университет, Зелена Гура, Польша

Материалы, используемые в медицине, включают нержавеющие стали, никелевые сплавы, титановые сплавы, сплавы на основе соединений кобальта и хрома и др. [1]. Наиболее часто используемые материалы – это нержавеющая сталь 316 L, титановый сплав Ti6Al4V и сплавы типа Co-Cr-Mo, Ni-Ti [2].

Исследуемый ниже титановый сплав имеет высокую прочность, низкий модуль упругости и низкую плотность. В контакте с организмом человека титан характеризуется превосходной коррозионной стойкостью, что делает его идеально пригодным для взаимодействия с людским организмом. Высокая механическая прочность титановых сплавов обеспечивает их высокую усталостную прочность и сопротивление механическим повреждениям. С другой стороны, эти сплавы характеризуются низкой обрабатываемостью, поскольку имеют низкую теплопроводность, низкий модуль упругости и высокую химическую активность. В ходе обработки в зоне резания возникают высокие температуры, происходит ускоренный износ инструмента, наблюдаются интенсивные вибрации, поэтому рекомендуется производить обработку с низкими скоростями резания

Форма стружки при обработке титановых сплавов тесно связана с режимами резания. Различия в формировании стружки наиболее заметно при высоких подачах и при высоких скоростях резания [3].

В [4] выполнен сравнительный анализ обработки титанового сплава Ti6Al4V без охлаждения и в условиях криогенического охлаждения. Установлено, что в последнем случае обеспечивается лучшая эффективность по сравнению с обработкой без охлаждения, поскольку уменьшается износ инструмента, улучшается качество обработанной поверхности, повышается способность стружколоманья.

В [5] анализировалось формирование стружки при точении титанового сплава Ti6Al4V в условиях охлаждения под высоким давлением. При этом зафиксировано увеличение интенсивности образования сегментированной стружки и

толщины стружки по сравнению с традиционными условиями охлаждения.

Механика стружкообразования имеет важное влияние на процесс обработки, тогда как форма стружки является внешним отражением физических процессов имеющих место при резании. На основании характера стружки можно получить информацию об особенностях обрабатываемой детали, специфики режущего инструмента и процесса обработки [6].

Целью исследования был анализ формирования стружки в условиях финишной токарной обработки титанового сплава Ti6Al4V.

Исследования выполнялись на токарном станке с ЧПУ CTX 510 ecoline. Использовались резцы с оправкой CoroTurn SDJCR 2525M 11 с неперетачиваемыми пластинами Coro Turn DCMX 11 T3 04-WM 1115 с покрытием (Ti,Al)N+(Al,Cr)₂O₃, нанесенным способом PVD. Углы режущего лезвия: главный угол в плане 93°, главный передний угол 18°, главный задний угол 7°, радиус вершины 0,4 мм, ширина фаски на передней поверхности 0,1 мм.

Точение выполнялось при резании без охлаждения и при охлаждении эмульсией на основе концентрата Castrol Alusol SL 51 XBB с рабочей концентрацией 7 %.

Обрабатывался титановый сплав Ti6Al4V, имеющий твердость ~334 НВ и временное сопротивление ~620 МПа.

Диапазон режимов резания: скорости резания 40–120 м/мин и подачи 0,05–0,4 мм/об. Использовалась постоянная глубина резания, равная 0,5 мм, что является характерным при финишной обработке.

Коэффициент утолщения стружки K_b является важным показателем, который характеризует особенности формирования стружки. Коэффициент определяет скорость перемещения стружки вдоль передней поверхности и используется для расчетов ряда параметров зоны стружкообразования, сил резания, остаточных напряжений в поверхностном слое и т. д. Величину коэффициента утолщения стружки можно рассчитать по формуле:

$$K_h = \frac{h_{ch}}{h_D},$$

где: h_{ch} – толщина стружки, h_D – толщина срезаемого слоя.

Для расчетов использовалась средняя толщина стружки. Формула для случая резания главной режущей кромкой и вершиной резца приведена в [7].

Основным параметром стружкообразования, на основании которого можно оценить практически все основные показатели процесса резания – силы и температуру резания, мощность резания, величину и знак остаточных напряжений и т. д. является угол сдвига. Значения угла сдвига определяли по формуле [8]:

$$\operatorname{tg} \Phi = \frac{\cos \gamma}{K_h - \sin \gamma},$$

где γ – передний угол, K_h – коэффициент утолщения стружки.

Планирование экспериментов было основано на методе Parameter Space Investigation (PSI). Он позволяет планировать эксперименты в условиях минимизации числа измерений, которые размещаются в строго упорядоченных точках исследуемого пространства. Делается это таким образом, чтобы проекции этих точек на оси многофакторного пространства располагались бы на этих осях (в нашем случае X_1 , X_2) на равных расстояниях друг от друга (рис. 1) [9].

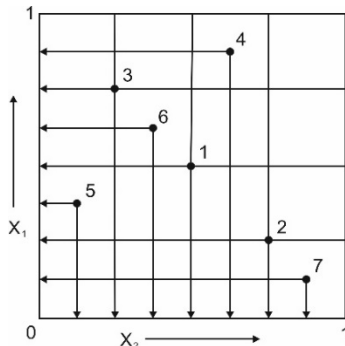


Рисунок 1 – Размещение точек измерения на осях X_1 и X_2 согласно методу PSI

Координаты точек измерения были рассчитаны на основе алгоритма, описанного в [8] и представленного в табл. 1, где $X_{\min} = 0$ и $X_{\max} = 1$. Количество 7 экспериментальных точек на каждой оси измерений является достаточным для выполнения статистических расчетов.

Точки измерений	Переменные	
	X_1	X_2
1	0,5000	0,5000
2	0,2500	0,7500
3	0,7500	0,2500
4	0,8750	0,6250
5	0,3750	0,1250
6	0,6250	0,3750
7	0,1250	0,8750

Статистическая обработка результатов исследования выполнялась при использовании программы Statistica.

На рис. 2 показаны изменения формы стружки в зависимости от скорости резания, подачи и условий охлаждения. Как в условиях обработки всухую, так и при охлаждении эмульсией в точках пространства 1,3,4,5,6 образуются путаные стружки. При резании всухую в областях точек 2 и 7 образуются спиральные длинные и короткие стружки. При резании с эмульсией в тех же самых областях образуются только спиральные короткие стружки. Таким образом, граница раздела в формообразовании стружки находится в диапазоне скоростей резания 40 – 80 м/мин и подач 0,2 – 0,4 мм/об.

На рис. 3 показаны изменения коэффициента утолщения стружки в зависимости от режимов резания и условий охлаждения.

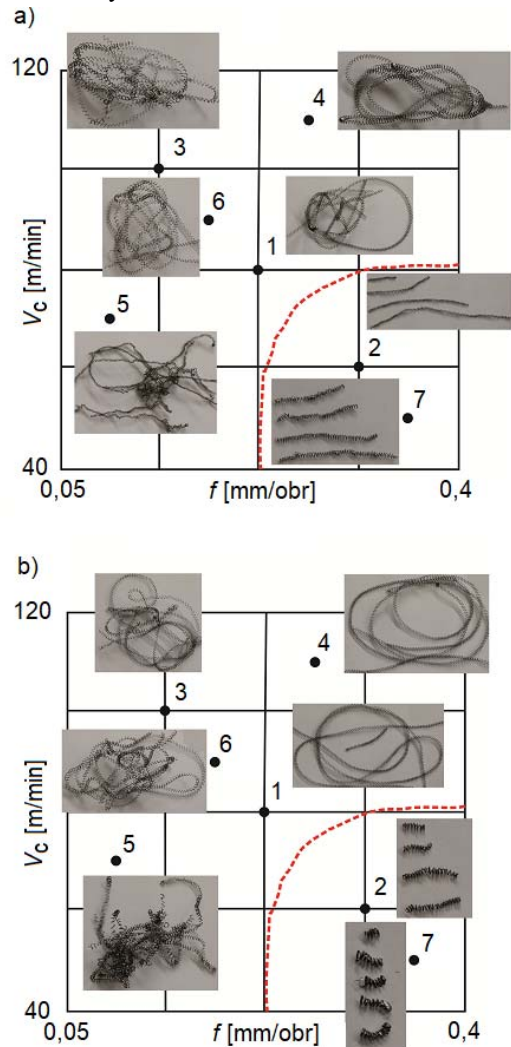


Рисунок 2 – Расположение координат 7 точек измерений и образованные в этих областях типы стружки: а) резание всухую, б) резание с эмульсией

Для расчета величины K_h найдены следующие уравнения регрессии:

– всухую $K_h = 2,183 - 0,002V_c - 1,57f$;

– с эмульсией $K_h = 2,223 - 0,002V_c - 1,996f$.

Для расчета величины Φ найдены следующие уравнения регрессии:

– всухую $\Phi = 25,297 + 0,037V_c + 30,143f$;

– с эмульсией $\Phi = 25,061 + 0,029V_c + 39,54f$.

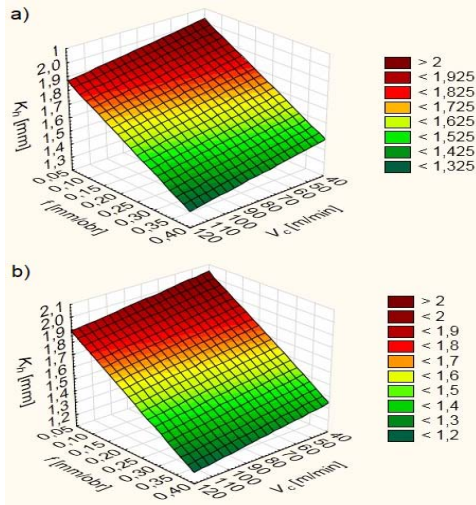


Рисунок 3 – Коэффициенты утолщения стружки в зависимости от скорости резания V_c и подачи f : а) резание всухую, б) резание с эмульсией

На рис. 4 показаны изменения углов сдвига в зависимости от режимов резания и условий охлаждения.

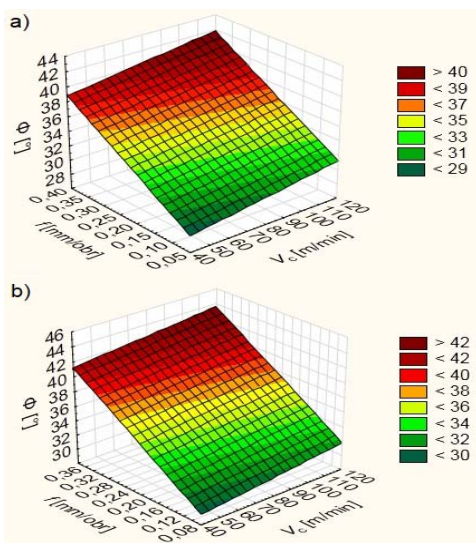


Рисунок 4 – Углы сдвига в зависимости от скорости резания V_c и подачи f : а) резание всухую, б) резание с эмульсией

На основании исследований можно утверждать, что интенсивности влияния скорости резания и подачи на коэффициент утолщения стружки и угол сдвига при резании всухую и с эмульсией близки.

Анализ результатов позволяет сделать следующие выводы:

- при обработке всухую образуются путанные, спиральные короткие или спиральные длинные стружки, тогда как при резании с эмульсией – путанные или спиральные короткие,
- влияние условий охлаждения на форму стружки незначительно,
- коэффициенты утолщения стружки при резании всухую и с эмульсией близки,
- независимо от условий охлаждения благоприятная форма стружки наблюдается при низких скоростях резания и большими подачами,
- независимо от условий охлаждения влияние подачи на коэффициент утолщения стружки и угол сдвига достаточно велико, тогда как влияние скорости резания незначительно.

Литература

1. Chen Q., Thouas G.A. Metallic implant biomaterials. *Materials Science and Engineering R*, Volume 87. – 2015. – pp. 1–57.
2. Ramsden J.J., Allen D.M., Stephenson D.J., Alcock J.R., Peggs G.N., Fuller G., Goch G. The Design and Manufacture of Biomedical Surfaces, *Annals of the CIRP*, Volume 56. – 2007. – pp. 687–711.
3. Batista M., Salguero J., Gomez-Parra A., Fernández-Vidal S., Marcos M. SOM based Methodology for Evaluating Shrinkage Parameter of the Chip Developed in Titanium Dry Turning Process, 14th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations (CIRP CMMO), *Procedia CIRP*, Volume 8. – 2013. – pp. 534–539.
4. Bordin A., Sartori S., Bruschi S., Ghiotti A. Experimental investigation on the feasibility of dry and cryogenic machining as sustainable strategies when turning Ti6Al4V produced by Additive Manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, Volume 142. – 2017. – pp. 4142–4151.
5. Palanisamy S., McDonald S.D., Dargusch M.S. Effects of coolant pressure on chip formation while turning Ti6Al4V alloy, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Volume 49. – 2009. – pp. 739–743.
6. Feldshtein E. Wybrane zagadnienia obróbki skrawaniem / E. Feldshtein. Zielona Góra: Oficyna wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego, 2013. – 222 s.
7. Силин С.С. Метод подобия при резании материалов. М. : Машиностроение, 1979. – 152 с.
8. Ящерицын П.И., Фельдштейн Е.Э., Корниевич М.А. Теория резания / П.И. Ящерицын, Е.Э. Фельдштейн, М.А. Корниевич. – 2-е изд., испр. и доп. – Мн.: Новое знание, 2006. – 512 с.
9. Statnikov R.B., Matusov J.B. Multicriteria Analysis in Engineering / R.B. Statnikov, J.B. Matusov. Dordrecht: Springer Science+Business Media, 2002. – 250 p.