

DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2026.01.009

АНАЛІЗ КУТА ЗСУВУ ТА ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ ТОЧІННІ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ Ti-6Al-4V ЗА ПІДВИЩЕНИХ ТЕМПЕРАТУР

Пастернак С.М.¹ [ORCID]

¹Національний університет «Львівська політехніка», аспірант, Україна

Анотація. У роботі проведено дослідження кута зсуву та пластичної деформації при точінні титанового сплаву Ti-6Al-4V за умов попереднього нагріву заготовки від 20 до 700 °C. За допомогою моделювання в середовищі DEFORM-2D із використанням моделі Johnson–Cook встановлено, що підвищення температури сприяє термічному розм'якшенню матеріалу та зниженню опору зсуву.

Результати моделювання демонструють поступове зростання середнього кута зсуву з 34° до 36,2° при збільшенні швидкості різання та температури, особливо у діапазоні 700 °C. Виявлено, що на стаціонарному етапі кут зсуву стабілізується, оскільки температура в зоні різання досягає 800–900 °C внаслідок інтенсивної деформації та тертя. Попередній нагрів до 500 °C забезпечує більш стабільний перехід до квазістаціонарного режиму порівняно з обробкою за кімнатної температури. Аналіз сумарної пластичної деформації показав її відносну стабільність, що підтверджує визначальний вплив кінематики процесу та геометрії інструмента на цей параметр.

Ключові слова: Ti-6Al-4V, титановий сплав, кут зсуву, чисельне моделювання, DEFORM-2D, модель Johnson–Cook, ортогональне різання, пластична деформація, температура заготовки, швидкість різання.

Вступ. Сучасне машинобудування потребує впровадження високоефективних методів обробки важкооброблюваних матеріалів, серед яких особливе місце посідає титановий сплав Ti-6Al-4V. Широке застосування цього сплаву в авіакосмічній та медичній галузях зумовлене його високою питомою міцністю, проте низька теплопровідність матеріалу призводить до концентрації значних теплових потоків безпосередньо у зоні різання. Це суттєво впливає на термомеханічний механізм деформації та інтенсивність зношування інструменту. Ключовим параметром, що визначає енергоємність, напружено-деформований стан та силові характеристики процесу, є кут зсуву. Саме він формує геометрію первинної зони пластичної течії, визначаючи характер стружкоутворення. Дослідження динаміки зміни цього кута за умов

попереднього термічного впливу є критично важливим для оптимізації технологічних параметрів та підвищення продуктивності обробки титанових сплавів [1,2].

Результати дослідження та їх аналіз

Кут зсуву розглядається як один із ключових параметрів процесу стружкоутворення, що визначає геометрію зони деформації, напружено-деформований стан матеріалу та силові характеристики різання. Моделювання ортогонального процесу різання виконано з використанням програмного комплексу DEFORM-2D із залученням термомеханічної моделі матеріалу Johnson–Cook, яка дозволяє враховувати спільний вплив деформації, швидкості деформації та температури на напруження течії [3]. Розрахунки проведено для температур заготовки 20, 300, 500 та 700 °С при швидкостях різання 60 і 100 м/хв за сталого значення подачі. Аналіз полів еквівалентних деформацій дав змогу ідентифікувати положення первинної зони зсуву та визначити середні значення кута зсуву [4,5].

У перші мілісекунди різання спостерігається підвищений кут зсуву, що є наслідком попереднього нагріву заготовки. На початковій стадії контакту інструмента з матеріалом (зона 1) заготовка перебуває у термічно розм'якшеному стані, внаслідок чого зменшується опір зсуву та формується більший кут зсуву. За цих умов пластична деформація концентрується вздовж похилої площини зсуву з меншими енергетичними витратами (рис.1).

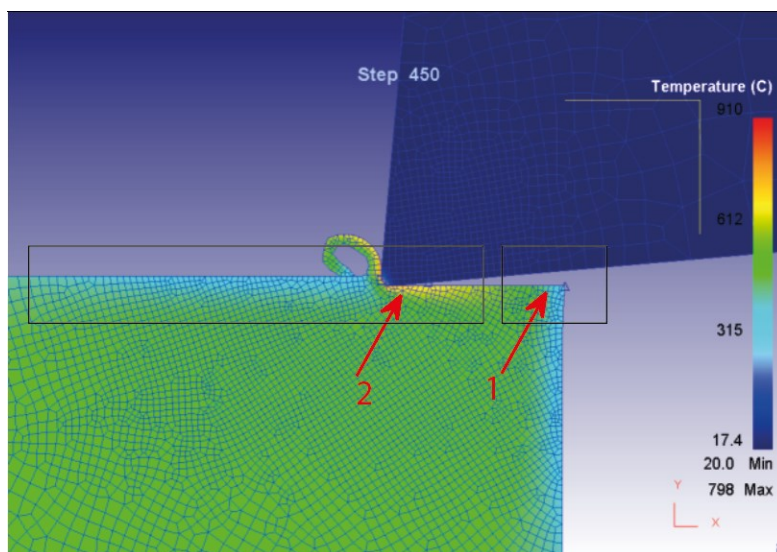


Рисунок 1 - Температурне поле в зоні різання при точінні нагрітої заготовки

На стаціонарному етапі формування стружки (зона 2) зміна кута зсуву є незначною, оскільки внаслідок інтенсивної деформації та тертя температура в первинній зоні зсуву швидко досягає 800–900 °С незалежно від початкової температури заготовки. Це забезпечує стабілізацію термічного розм'якшення та перехід процесу зсуву в квазістаціонарний режим.

Отримані результати свідчать про поступове зростання кута зсуву зі збільшенням температури заготовки. У діапазоні низьких і помірних температур (до 500 °С) зміна цього параметра є незначною, тоді як при температурі 700 °С спостерігається більш виражене його зростання, що пов'язано з інтенсивним термічним розм'якшенням матеріалу та зниженням опору пластичній деформації в зоні зсуву.

Аналіз часових залежностей кута зсуву показав, що початкова температура заготовки суттєво впливає на перехідні режими різання. За кімнатної температури характерним є різке врізання інструмента з помітними коливаннями кута зсуву, що зумовлено високою жорсткістю матеріалу та поетапним формуванням пластичної зони. У подальшому процес поступово переходить у стаціонарний режим. Натомість при попередньому нагріванні заготовки до 500 °С процес різання з перших моментів характеризується стабільною поведінкою, що свідчить про готовність матеріалу до квазістаціонарного пластичного зсуву. Отримані кількісні дані щодо значень кута зсуву для різних режимів наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Значення кута зсуву для різних режимів різання

t, °С	v = 60 м/хв	v = 100 м/хв
20	32,66	34,01
300	33,80	34,58
500	34,35	35,54
700	34,40	36,18

Кількісний аналіз результатів моделювання показав, що зі зростанням температури від 20 до 700 °С середнє значення кута зсуву збільшується приблизно з 34° до 36,2°, причому основна частина зростання припадає на

високотемпературний діапазон. Така тенденція узгоджується з термомеханічною природою процесу різання, за якої зниження напружень течії призводить до переорієнтації площини зсуву під більшим кутом до напрямку різання.

Дослідження сумарної (effective) пластичної деформації, показало її відносну стабільність у широкому температурному інтервалі. Незначне зростання цього параметра при підвищених температурах вказує на те, що рівень накопиченої деформації визначається переважно кінематичними умовами процесу та геометрією інструмента, тоді як температура головним чином впливає на локалізацію деформації та величину напружень у зоні зсуву.

Висновки

На основі чисельного моделювання в DEFORM-2D встановлено, що початкова температура заготовки суттєво впливає на термомеханічний стан зони різання сплаву Ti-6Al-4V. Підвищення температури до 700 °C призводить до зростання кута зсуву з 33° до 37° через термічне розм'якшення матеріалу та зниження опору деформації. Вплив попереднього нагріву найбільш відчутний на стадії врізання, тоді як у стаціонарному режимі процес стабілізується під дією локального тепловиділення. Сумарна пластична деформація залишається відносно стабільною, що підтверджує домінування кінематичних чинників над температурними.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. H. A. Kishawy and A. Hosseini, *Machining Difficult-to-Cut Materials*. Cham: Springer, 2019.
2. D. A. Stephenson and J. S. Agapiou, *Metal Cutting Theory and Practice*, 3rd ed. CRC Press, Taylor and Francis Group, 2016.
3. DEFORM, *Metal Forming Simulation Software*. Accessed: Nov. 5, 2025. [Online]. Available: <https://www.deform.com/>
4. C. Kılıçaslan, “Modelling and Simulation of Metal Cutting by Finite Element Method,” Master’s thesis, İzmir Inst. of Technol., İzmir: Turkey, 2009.
5. J. P. Davim, Ed., *Machining of Titanium Alloys*, Berlin: Springer, 2014.

**ANALYSIS OF SHEAR ANGLE AND PLASTIC DEFORMATION IN TURNING OF
Ti-6Al-4V TITANIUM ALLOY AT ELEVATED TEMPERATURES**

Serhiy Pasternak

Abstract. *This study investigates the shear angle and plastic deformation during the turning of Ti-6Al-4V titanium alloy under conditions of workpiece preheating from 20 to 700 °C. Using DEFORM-2D simulation with the Johnson–Cook constitutive model, it was established that increasing the temperature promotes thermal softening of the material and reduces shear resistance.*

The simulation results demonstrate a gradual increase in the average shear angle from 34° to 36.2° with increasing cutting speed and temperature, particularly in the 700 °C range. It was found that at the steady-state stage, the shear angle stabilizes because the temperature in the cutting zone reaches 800–900 °C due to intense deformation and friction. Preheating to 500 °C provides a more stable transition to the quasi-steady-state regime compared to machining at room temperature. Analysis of the total (effective) plastic strain showed its relative stability, confirming the dominant influence of process kinematics and tool geometry on this parameter.

Keywords: *Ti-6Al-4V, titanium alloy, shear angle, numerical simulation, DEFORM-2D, Johnson–Cook model, orthogonal cutting, plastic deformation, workpiece temperature, cutting speed.*