

КОЗЯР ЯРОСЛАВ

Державний університет «Житомирська політехніка»  
e-mail: [kmi\\_kyaa@ztu.edu.ua](mailto:kmi_kyaa@ztu.edu.ua)

БАЛИЦЬКА НАТАЛІЯ

Державний університет «Житомирська політехніка»  
<https://orcid.org/0000-0003-1363-8110>  
e-mail: [tmkts\\_nno@ztu.edu.ua](mailto:tmkts_nno@ztu.edu.ua)

ПОЛОНСЬКИЙ ЛЕОНІД

Державний університет «Житомирська політехніка»  
<https://orcid.org/0000-0002-4347-9088>  
e-mail: [pol@ztu.edu.ua](mailto:pol@ztu.edu.ua)

## АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ОСОБЛИВОСТЕЙ ФРЕЗЕРУВАННЯ ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ

В роботі представлено огляд особливостей механічної обробки жароміцних сплавів. Наведено класифікацію жароміцних сплавів згідно з ISO 513:2012 та описано фізико-механічні властивості найбільш широко застосовуваних марок цих матеріалів. Описано явища, які супроводжують процес різання та зумовлюють низьку оброблюваність жароміцних сплавів. Проведено огляд підходів та рекомендацій, які пропонуються сучасними практиками та дослідниками для забезпечення ефективного фрезерування жароміцних сплавів.

**Ключові слова:** фрезерування, жароміцні сплави, оброблюваність

KOZIAR YAROSLAV, BALYTSKA NATALIA, POLONSKY LEONID  
Zhytomyr Polytechnic State University

### A REVIEW ON THE FEATURES OF HEAT-RESISTANT ALLOYS MILLING

Effective milling of heat-resistant alloys, regardless of which subgroup they belong to, is a complex task that requires special technological approaches. High temperatures in the cutting zone, high cutting forces, vibrations, abrasive wear and segmented chips complicate the machining process. Thus, the overall machinability of heat-resistant alloys is more than half that of conventional structural steels. Taking into account the constant growth of demand for alloys of this group, the question of their effective processing is certainly an urgent task of modern mechanical engineering. The paper provides an overview of the features of milling heat resistant alloys. The classification of heat resistant alloys according to ISO 513:2012 is given and the physical and mechanical properties of the most common grades are described. Machining characteristics are discussed, as well as phenomena accompanying the cutting process causing poor machinability. Approaches and recommendations for effective machining of heat resistant alloys from modern practitioners and researchers are reviewed. The use of modern tool materials, tool coatings, coolant and lubrication systems and other methods are considered. Among the most effective are: high pressure cooling through the tool (HPC), cryogenic cooling, carbide tools with PVD and CVD coatings, other promising tool materials, vibration control systems in the cutting zone, etc.

**Key words:** milling, heat-resistant alloys, machinability.

### Постановка проблеми

В останні десятиліття спостерігається значне зростання областей застосування жароміцних сплавів (суперсплавів). Їх використовують для виготовлення деталей двигунів, газових турбін, у енергетичному машинобудуванні, медицині та інших галузях. Затребуваність жароміцних сплавів пов'язана із їх особливими властивостями. Основними характеристиками жароміцних сплавів є висока теплостійкість, стійкість до корозії та механічна міцність, що дозволяє їх експлуатацію при температурах понад 600 °С.

Однак, ті ж властивості, які є перевагами під час експлуатації, ускладнюють процес оброблення жароміцних сплавів. Низька теплопровідність та висока твердість призводять до утворення сегментної стружки, високих динамічних сил різання та виділення значної кількості тепла в зоні різання, що значно ускладнює процес обробки.

Оскільки жароміцні сплави не мають легкооброблюваних аналогів, то це стимулює проведення досліджень з метою покращення ефективності їх оброблення.

Процеси механічної обробки жароміцних сплавів є об'єктом великої кількості наукових досліджень. За декілька останніх десятиліть вченими та практиками було розроблено різні підходи, спрямовані на підвищення продуктивності та якості оброблення цих матеріалів.

Забезпечення необхідної ефективності фрезерування жароміцного сплаву конкретної марки вимагає пошуку оптимального інструментального матеріалу, стратегії обробки, режиму різання, мастильно-охолоджувального технологічного середовища та ін.

Не існує уніфікованого підходу щодо обробки усіх жароміцних сплавів, проте часто наводяться загальні практичні рекомендації. Важливим завданням є їх систематизація для відповіді на сучасні технологічні виклики та подальшого прогресу в ефективній лезовій обробці жароміцних сплавів.

Метою даної роботи є огляд, аналіз та систематизація відомих сучасних досліджень в області механічної обробки жароміцних сплавів, а також розробка рекомендації щодо підвищення ефективності їх фрезерування.

### Викладення основного матеріалу

**Класифікація жароміцних сплавів.** Відповідно до класифікації згідно ISO 513:2012 жароміцні сплави за хімічним складом поділяються на чотири підгрупи [1]. У відповідності до цієї класифікації, перша підгрупа жароміцних сплавів включає сплави на основі заліза. Вони не широко розповсюджені у промисловості, через низьку теплостійкість, порівняно із представниками інших підгруп. Здебільшого, окрім заліза, такі сплави містять інші елементи, які у відсотковому співвідношенні є близькими до елементу основи і відповідають за забезпечення необхідних експлуатаційних параметрів. Одним із найбільш широко використовуваних сплавів на основі заліза є Alloy 321 (Greek Ascology) (табл. 1).

До другої підгрупи відносяться сплави на основі нікелю. Вони є найбільш поширеними серед усіх жароміцних сплавів через можливість зберігати свої властивості при високих температурах (700...1300 °С). Нікелеві сплави використовуються для виготовлення деталей газових турбін авіаційних двигунів, енергетичних установок, газової та нафтохімічної промисловості тощо. Варто відзначити, що сучасні авіаційні двигуни на більш ніж 50% складаються із жароміцних сплавів на основі нікелю. Одним з найбільш популярних представників цієї підгрупи є сплав Inconel 718 (табл. 1).

Сплави на основі кобальту відносять до третьої підгрупи, вони також представлені у декількох композиціях, включаючи Co-Cr, Co-Cr-Ni, Co-Cr-Ni-W та високолеговані багатоконпонентні сплави. Сплави на основі кобальту мають високий коефіцієнт термічного розширення в інтервалі температур 20...810 °С, жароміцність, високу корозійну стійкість та особливі магнітні властивості. Сплав L605 є найбільш відомим (табл. 1).

До четвертої підгрупи відносять сплави на основі титану. Зазвичай вони застосовуються в авіаційній промисловості, медицині та харчовій промисловості. Вони мають унікальні властивості міцності та корозійної стійкості, дозволяють працювати при високих температурах (до 900 °С) і відрізняються низькою питомою вагою. Сплав ІМІ 834 є одним із найбільш використовуваних сплавів на основі титану (табл. 1).

Найбільш поширеними жароміцними сплавами є сплави на основі нікелю та на основі титану, оскільки вони мають унікальні властивості та широкий спектр застосувань. Але, разом із тим, їх обробка також є найбільш складною поміж усіх сплавів жароміцної групи.

Окремо варто виділити Ni-Ti сплави (нікеліди титану, нітиноли) з ефектом пам'яті форми. Ефект пам'яті форми полягає у відновленні вихідної форми конструктивного елемента при температурі фазового перетворення під час нагрівання. Нікеліди титану характеризуються високою корозійною стійкістю, міцністю, біологічною сумісністю та демпфуючою здатністю. Разом із тим вони відрізняються дуже низькою технологічністю та оброблюваністю, а також та високою вартістю [2]. Сплави Ni-Ti знаходяться в мартенситній фазі при низьких температурах і в аустенітній фазі – при високих температурах. Саме це зумовлює особливості механічної обробки цих особливих інтелектуальних матеріалів. Питання механічної обробки нітинолів, зазвичай, обговорюються в окремих дослідженнях за рамками робіт про жароміцні сплави.

Властивості найбільш відомих марок кожної із підгруп жароміцних сплавів та, для порівняння, сталі 20 наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

#### Властивості жароміцних сплавів та сталі 20

Матеріал	Твердість (HRC)	Теплостійкість (°С)	Густина (г/см <sup>3</sup> )	Відносна оброблюваність (%)
Сталь 20	20...25	до 500	7,8	100
Alloy 321 (Greek Ascology)	30...40	до 700	7,8	40...60
Inconel 718	36...41	253...1000	8,2	40...60
L605	20...25	253...982	8,2	50...70
ІМІ 834	22...35	253...600	4,5	70...80
Ti	22...40	250...900	4,5	80...90

**Примітка.** Наведені значення є орієнтовними, вони можуть варіюватися в залежності від умов обробки, хімічного складу, матеріалу та інших факторів.

**Оброблюваність жароміцних сплавів.** Незважаючи на широке застосування, жароміцні сплави відносяться до важкооброблюваних матеріалів. Описуючи оброблюваність цих сплавів Sandvik Coromant [3] зазначає, що вона погіршується у наступній послідовності: сплави на основі заліза, кобальту, титану та нікелю. Усі сплави цієї групи мають високу жароміцність, твердість та низьку теплопровідність. При обробці різанням висока твердість та низька теплопровідність матеріалів призводить до виникнення високих температур в зоні різання. Висока міцність, механічне та адгезійне зміцнення жароміцних сплавів створюють абразивне середовище, яке негативно впливає на стійкість різальної кромки інструменту. Тонка стружка, яка схильна до пластичної деформації, створює область тісного контакту на передній поверхні різального інструменту з концентрацією сил різання поблизу різальної кромки. Збільшення швидкості різання може призвести до хімічної реакції між стружкою та матеріалом різального інструменту, і, як

результат до відмови інструменту. Тому інструментальні матеріали повинні мати досить велику твердість при високих температурах та не вступати у хімічну реакцію із оброблюваним матеріалом.

У роботі [4], яку присвячено суперсплавам, описуються особливості їх механічної обробки. Авторами зазначається, що сплави на основі кобальту та заліза зазвичай легше піддаються механічній обробці, ніж сплави на основі нікелю та титану, при аналогічних температурних умовах. Однак сплави на основі заліза мають проблеми із дробленням стружки, і, відповідно, потребують спеціальної геометрії інструменту. Авторами виділяють наступні особливості обробки більшості суперсплавів: збереження міцності при високих температурах, високі динамічні сили різання, наявність у структурі твердих карбідів, які роблять сплави абразивними, зміцнення при різанні, складність тепловідводу.

**Особливості фрезерної обробки титанових сплавів.** Відома компанія-виробник різального інструменту Iscar виділяє наступні особливості різання титанових сплавів [5]: низька теплопровідність титанових сплавів погіршує теплопередачу та уповільнює тепловіддачу із зони різання; інтенсивне виділення тепла призводить до інтенсивного адгезійного зношування різальної кромки інструмента; низький модуль пружності сприяє виникненню вібрацій та погіршує параметри точності та якості оброблених поверхонь. Ці фактори справляють негативний вплив на продуктивність оброблення та стійкість різального інструменту, а їх інтенсивність залежить від групи сплаву.

За металургійними характеристиками титанові сплави поділяються на такі групи: технічний титан (нелегований), що має хорошу корозійну стійкість, але низьку міцність;  $\alpha$ -сплави, що складаються тільки з  $\alpha$ -фази та мають безліч  $\alpha$ -стабілізаторів, які характеризуються збереженням міцності при високій температурі; псевдо- $\alpha$ -сплави, які є  $\alpha$ -сплавами з невеликим додаванням  $\beta$ -стабілізаторів і мають добрий опір повзучості при робочих температурах 450 ... 550 °С;  $\alpha$ - $\beta$ -сплави, які є сумішшю обох фаз і містять  $\alpha$ - і  $\beta$ -стабілізатори;  $\beta$ -сплави, що містять досить велику кількість  $\beta$ -стабілізаторів для отримання структури  $\beta$ -фази після обробки або навіть у деяких випадках – охолодження. Шкалу оброблюваності титану та його сплавів по групах показано на рис. 1.

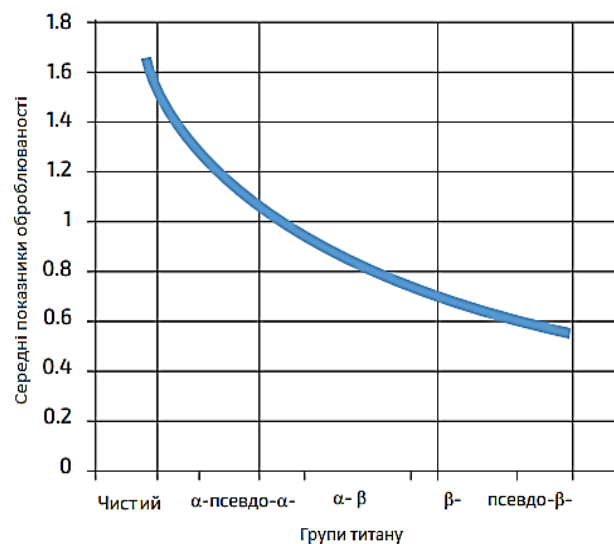


Рис. 1. Оброблюваність титанових сплавів (середні показники) [5]

Iscar [5] наводить наступні рекомендації для забезпечення високої ефективності фрезерування титану та його сплавів:

- Зменшення дуги контакту (ширини різання  $a_e$ ) різальної пластинки із оброблюваною деталлю знижує теплове навантаження на різальну кромку інструмента.
- Рекомендується використовувати врізання інструменту за дугою, оскільки це дозволяє поступово навантажувати різальну кромку, підвищити стабільність обробки та стійкість інструменту.
- Механічну обробку титанових сплавів рекомендовано проводити до термічної обробки чи старіння через значне погіршення оброблюваності після.

Рекомендації щодо вибору різального інструменту для обробки титану та його сплавів [5]:

- Для обробки технічного титану варто застосовувати інструменти із позитивним переднім кутом, а при обробці більш важкооброблюваних сплавів – з негативним переднім кутом та зі зміцнюючою фаскою.
- Матеріал і конструкція інструменту повинні забезпечувати високу гостроту різальної кромки та стійкість в умовах інтенсивного тепловиділення.
- Для фрезерування титану варто застосовувати тверді сплави із покриттями. Покриття, нанесені методом PVD (Physical vapor deposition), забезпечують кращу гостроту різальної кромки, порівняно із покриттями, нанесеними методом CVD (Chemical vapor deposition). CVD-покриття у обробці сплавів цієї групи здебільшого застосовуються для інструментів, які призначені для чорнових операцій.
- Різальна кераміка і кубічний нітрид бору (CBN) не є раціональним вибором для обробки титану. Полікристалічний алмаз (PCD) добре зарекомендував себе для умов чистової обробки.

- Рекомендовано застосування МОТС (мастильно-охолоджувального технологічного середовища) за технологією НРС (high pressure cooling) із подачею через шпиндель під тиском.

**Особливості фрезерної обробки сплавів на основі нікелю.** Питання оброблюваності сплавів на основі нікелю досліджувалися у роботах [6–10]. Процес обробки цих сплавів розглядається як важкий, що обумовлено їх властивостями: високою теплостійкістю, твердістю та низькою хімічною стійкістю до зношування. Основною проблемою ефектної обробки нікелевих сплавів є низька стійкість різального інструменту. Механізм зношування різальних інструментів при обробці нікелевих сплавів описаний у роботах [11–13].

Можна виділити наступні особливості фрезерної обробки жароміцних сплавів на основі нікелю: високі сили різання; низька теплопровідність сплавів (сприяє утворенню високих температур в зоні різання); інтенсивне абразивне зношування різального інструменту; деформаційне зміцнення приповерхневого шару обробленої поверхні.

Згадані вище особливості спостерігаються при обробці усіх сплавів цієї підгрупи, а їх інтенсивність залежить від властивостей оброблюваного матеріалу. Найбільше на стійкість інструментів впливає вміст нікелю в сплаві, відповідна залежність показана на рис. 2.

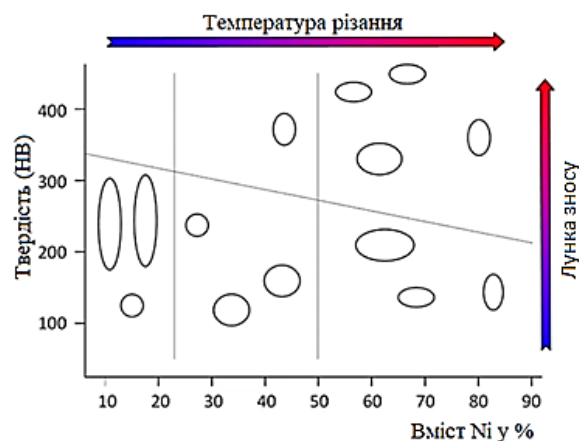


Рис. 2. Залежність стійкості різального інструменту від вмісту нікелю у сплаві [6]

Беручи до уваги розглянуті особливості обробки жароміцних сплавів на основі нікелю, варто виділити наступні рекомендації для їх механічної обробки.

Ефективність охолодження під високим тиском НРС (high pressure cooling) доведена роботами [14, 15]. Незважаючи на це, застосування технології НРС обмежують через негативний вплив охолоджувача на навколишнє середовище.

При фрезерній обробці інструментами із твердих сплавів варто особливу увагу приділяти підбору інструментального покриття та методу його нанесення. Правильно підібране покриття дозволяє збільшити стійкість інструменту більше ніж на 50% [16].

Застосування різальної кераміки SiAlON при високошвидкісній обробці забезпечує найкращу стійкість інструменту при високій продуктивності. У роботі [17] авторами було забезпечено високу продуктивність торцевого фрезерування інструментом із SiAlON.

Використання перспективного різального інструменту із нанокристалічного нітриду бору (без зв'язки) дозволяє значно підвищити продуктивність обробки порівно із твердими сплавами.

Підвищити продуктивність обробки та стійкість інструменту можливо також використовуючи текстуровані різальні інструменти [18]. Текстури на контактних поверхнях інструменту утворюють мікропори, у яких затримуються охолоджувальні рідини, що дозволяє підвищити стійкість інструменту.

**Особливості фрезерної обробки сплавів на основі кобальту.** Сплави на основі кобальту поєднують у собі гарні характеристики корозійної стійкості, зносостійкості, високої стійкості до повзучості, жаростійкості та біосумісності. Їх широко використовують для виготовлення імплантів, особливо для високонавантажених суглобів [19]. Оброблюваність сплавів цієї підгрупи порівняна із сплавами на основі нікелю та титану. Процес їх фрезерної обробки супроводжується наступними особливостями [20]:

- Кобальт, хром та молібден збільшують опір деформації, що призводить до збільшення сил різання та опору різанню.

- Фрезерна обробка таких сплавів, зазвичай, супроводжується низькою стійкістю інструментів, порівняно із звичайними сталями, та низькою якістю поверхні через тепловиділення та високу пластичну деформацію.

- Глибина різання і подача суттєво впливають на знос інструменту та сили різання.

- Адгезійний знос і відколи є домінуючими видами зношування при фрезеруванні.

Більшість виробів із сплавів цієї підгрупи – це високонавантажені імпланти, тому механічна

обробка повинна забезпечувати цілісність поверхні та включати мінімальну можливу кількість залишкових напружень в поверхневому шарі обробленої поверхні.

Зважаючи на описані вище особливості фрезерної обробки жароміцних сплавів на основі кобальту рекомендації з їх фрезерування наступні:

- Застосування інструменту з позитивним переднім кутом для мінімізації зміцнення оброблюваної поверхні та наростотворення.

- Використання інструментів з PVD-покриттями (TiN/TiCN/Ti, TiN, TiN/TiCN/TiAlN, TiN/TiCN, AlTiN, TiAlN, TiSiC) та з CVD-покриттями (TiN/TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN), тип покриття варто обирати для кожного випадку індивідуально, в залежності від умов обробки.

- Застосування охолодження кріогенного типу (заготовка витримується при невеликих або глибоких від'ємних температурах < -190 °C) та НРС охолодження, яке здійснюється через інструмент.

**Особливості фрезерної обробки сплавів на основі заліза.** Сплави на основі заліза є більш дешевою альтернативою сплавам на основі нікелю і використовуються для здешевлення деталей, які повинні експлуатуватися в умовах підвищених температур (до 700 °C). Механічна обробка сплавів цієї підгрупи супроводжується наступними особливостями:

- Сплави на основі заліза отримують значне зміцнення та велику пластичну деформацію в процесі механічної обробки [21].

- Низька теплопровідність сплавів призводить до високої температури в зоні різання.

- Має місце схильність до вібрацій під час фрезерування.

- Швидке зношування різального інструменту через абразивність сплавів та високі сили різання в процесі обробки.

- Жароміцні сплави на основі заліза мають тенденцію утворювати довгу, ламку стружку, що може призводити до проблем із дробленням стружки та стійкістю різального інструменту [22].

Зважаючи на особливості обробки жароміцних сплавів на основі заліза варто виділити наступні рекомендації щодо їх фрезерної обробки:

- При фрезеруванні варто застосовувати МОТС для зниження температури в зоні різання.

- Використання інструментів із PVD та CVD покриттями. Для визначення типу та складу покриття варто керуватися хімічними властивостями оброблюваного сплаву, і умовами конкретного технологічного процесу.

- При глибині різання менше ніж 5 мм головний кут у плані повинен становити менше ніж 45°.

- Як показує практика, найкраще використовувати круглі пластини з позитивною геометрією для підсилення ефекту потоншення стружки.

### Висновки

Розглянувши особливості процесу фрезерування жароміцних сплавів різних підгруп (сплави на основі нікелю, кобальту, заліза, титану), а також проаналізувавши і узагальнивши рекомендації останніх досліджень за цією темою, можна підсумувати наступне.

Головними проблемами при фрезерній обробці жароміцних сплавів є високі температури в зоні різання, низька стійкість різального інструменту та виникнення вібрацій.

Для зменшення впливу високих температур в зоні різання на стійкість різального інструменту рекомендованим є застосування МОТС. Найефективнішими вважаються методи НРС та кріогенного охолодження через їх високу ефективність тепловідведення.

Найчастіше для фрезерної обробки використовують інструменти із твердих сплавів зі зносостійкими покриттями. з PVD-покриттями (TiN/TiCN/Ti, TiN, TiN/TiCN/TiAlN, TiN/TiCN, AlTiN, TiAlN, TiSiC) та з CVD-покриттями (TiN/TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN). Для обробки сплавів на основі нікелю також застосовують різальну кераміку та нанополікристалічний нітрид бору (без зв'язки), для чистового фрезерування титанових сплавів - полікристалічний алмаз. Вони забезпечують високу стійкість інструменту та високу продуктивність обробки.

Перспективним методом підвищення стійкості різального інструменту є текстурування його різальних поверхонь, що покращує його трибологічні властивості, зменшує сили різання та температуру в зоні різання за рахунок зменшення площі контакту між поверхнями інструменту і стружкою.

Рекомендовані у цій роботі підходи варто розглядати як базові, такі що забезпечують високі параметри оброблюваності у більшості випадків фрезерування жароміцних сплавів, але не виключають можливості ефективного застосування інших методів або комплексу різних методів.

### References

1. Classification and application of hard cutting material for metal removal with defined cutting angles. Designation of main groups and application groups. (ISO 513:2012) : ISO 513:2012.
2. Hlembotska L., Balytska N., Melnychuk P., Melnyk O. (2019). Computer modelling power load of face mills with cylindrical rake face of inserts in machining difficult-to-cut materials. Scientific Journal of TNTU (Tern.), vol. 93, no 1, pp. 70–80. [https://doi.org/10.33108/visnyk\\_tntu2019.01](https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2019.01)

3. Processed materials. Sandvik Coromant – Mode of access to the resource. <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/materials/workpiece-materials>.
4. Stephen J. Donachie, Matthew J. Donachie. 2002. SUPERALLOYS: A TECHNICAL GUIDE. 439 p.
5. Reference Guide for Machining Titanium: ISCAR. 2019. 60 p.
6. Muhammad A. Machinability study of Inconel 718 for face milling operation using coated carbide tool. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020. 4013-4025 p.
7. Özel T. Modeling of cutting forces in helical end milling of Inconel 718 using carbide tools / Özel T. // Journal of Materials Processing Technology. — 1998 —779-785 p. [https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(01\)00020-0](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(01)00020-0)
8. Özel T. Experimental investigation of cutting temperature and surface integrity in high-speed milling of Inconel 718 alloy with coated carbide inserts. Journal of Materials Processing Technology. 2002. 275-288 p. <https://doi.org/10.1080/10910344.2014.863627>
9. Özel T. Predictive modeling of cutting forces and tool wear in hard turning using regression and neural networks / Özel T. // Journal of Materials Processing Technology. 2003. 69-79 p. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.06.011>
10. Pale S., Tarlochan S. Tool wear characteristics and optimization of cutting parameters during turning of nickel-based Hastelloy C-22HS alloy using coated carbide inserts. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2000. 377-387 p.
11. Yigit R. Investigation of cutting forces and surface roughness in ball end milling of Inconel 718. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2012. 32-38 p.
12. Jiang Y. Cutting performance of PCBN tools in high-speed milling of nickel-based superalloy GH4169. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014. 1655-1667 p. <https://doi.org/10.1179/1432891715Z.0000000001381>
13. Xu R., Zhou Y., Li X., Yang S., Han K., Wang S. The Effect of Milling Cooling Conditions on the Surface Integrity and Fatigue Behavior of the GH4169 Superalloy. Metals. 2019; 9(11):1179. <https://doi.org/10.3390/met9111179>
14. Xia R. Cutting force model and optimization for high-speed milling GH4169 superalloy. Journal of Materials Processing Technology. 2005. 342-347 p.
15. Research of the milling process of nickel alloys based on heat-resistant alloys: materials of the All-Ukrainian scientific and technical conference ["State and prospects of the development of metalworking technologies"], 2017. 71-75 p.
16. Sun J., Huang S., Ding H. Cutting performance and wear mechanism of SiAlON ceramic tools in high-speed face milling GH4099. Ceramics International. 46.12. 2020. 1621-1630 p. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.09.134>
17. Enomoto T., Sugihara T. Improving anti-adhesive properties of cutting tool surfaces by nano-micro-textures. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 59.1. 2010. 597-600 p. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.130>
18. Patel N., Gohil P. A review on biomaterials: scope, applications & human anatomy significance. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. 2.4. 2012. 91-101 p.
19. Soham Deshpande, 2019, A Review on Appropriateness of Cobalt based Alloys and Super Alloys for Machining, INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH & TECHNOLOGY (IJERT) Volume 08, Issue 01 (January – 2019).
20. Novikov F., Zhovtobryukh V., Novikov D. F. 2023. Innovative solutions and technologies of metalworking production, Dnipro: LIRA.
21. Paulo Davim J., 2014, Machining of Hard Materials. Springer London, 78 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-84996-450-0>
22. Superalloy machining. Iscar. <https://www.iscar.com/newarticles.aspx/lang/en/newarticleid/10936>
23. Balytska N.O. Features of face milling of Ni-Ti alloys with shape memory effect. Technical engineering. Series: Applied mechanics. 2022. Issue 2(90). P. 3-12. [https://doi.org/10.26642/ten-2022-2\(90\)-3-12](https://doi.org/10.26642/ten-2022-2(90)-3-12)