

А. А. СИМОНОВА

кандидат технічних наук, доцент,
докторант кафедри машинобудування
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
ORCID: 0000-0003-1411-6656

В. Д. КУЛИНИЧ

кандидат технічних наук,
старший викладач кафедри машинобудування
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
ORCID: 0000-0003-1702-2989

Р. Г. АРГАТ

кандидат технічних наук,
доцент кафедри машинобудування
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
ORCID: 0000-0001-9247-5297

В. В. ДРАГОБЕЦЬКИЙ

доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри машинобудування
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
ORCID: 0000-0001-9637-3079

ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ МІЦНОСТІ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ МАТЕРІАЛІВ, ЯКІ НЕ ПІДДАЮТЬСЯ ГАРТУВАННЮ

У сучасній науці та індустрії постійно зростає потреба у матеріалах з покращеними властивостями, зокрема міцності. Однак, багато високоефективних матеріалів, такі як певні види металів та сплавів, а також полімерів, не піддаються традиційному гартуванню, що обмежує їхнє застосування в областях, де високі механічні властивості є критично важливими. Це дослідження спрямоване на розробку нових методів зміцнення поверхневих шарів таких матеріалів. Очікується, що результати цього дослідження значно розширять можливість використання цих матеріалів, особливо в таких сферах, як аерокосмічна промисловість та медицина, забезпечуючи більшу довговічність та надійність виробів. У даній науковій статті досліджено вплив деформуючого різання на мікротвердість та деформаційне зміцнення поверхневого шару титанових сплавів ВТ8 та ВТ1-0. Метою дослідження було визначення ефективності деформуючого різання як методу зміцнення поверхневого шару титанових сплавів з різною теплопровідністю. Новизною є вивчення впливу деформуючого різання на мікротвердість та деформаційне зміцнення цих сплавів, порівняння ефективності для сплавів з різною теплопровідністю, а також встановлення обмежень та напрямків для подальших досліджень. Результати показали, що деформуюче різання призводить до збільшення мікротвердості на 10–15% для ВТ8 та на 40% для ВТ1-0, що пояснюється різницею у теплопровідності сплавів. Для сплавів з низькою теплопровідністю, таких як ВТ8, потрібні додаткові джерела деформації або температурний вплив для досягнення більшого ступеня зміцнення. Практичне значення полягає у використанні результатів дослідження для розробки нових технологій зміцнення поверхневого шару титанових сплавів з різними властивостями. Завдяки цьому підходу, можливості зміцнення матеріалів значно розширюються, відкриваючи шлях для створення нових генерацій міцних та легких конструкцій. Впровадження цих інноваційних методів може сприяти революції у виробництві, зменшуючи виробничі витрати та покращуючи екологічність процесів.

Ключові слова: деформуюче різання, титанові сплави, мікротвердість, деформаційне зміцнення, теплопровідність.

A. A. SYMONOVA

PhD, Associate Professor,
Doctoral Student at the Mechanical Engineering Department
Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
ORCID: 0000-0003-1411-6656

V. D. KULYNYCH

PhD, Senior Lecturer at the Mechanical Engineering Department
Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
ORCID: 0000-0003-1702-2989

R. H. ARGAT

PhD, Associate Professor at the Mechanical Engineering Department
Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
ORCID: 0000-0001-9247-5297

V. V. DRAHOBETSKYI

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Mechanical Engineering Department
Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
ORCID: 0000-0001-9637-3079

RESEARCH OF WAYS TO INCREASE THE STRENGTH OF THE SURFACE LAYER OF NOT HARDENABLE MATERIALS

In modern science and industry, there is a growing need for materials with enhanced properties, particularly strength. However, many high-performance materials, such as certain types of metals, alloys, and polymers, do not undergo traditional hardening, which limits their application in areas where high mechanical properties are critically important. This research is focused on developing new methods for strengthening the surface layers of such materials. We expect that the results of this study will significantly expand the possibilities for using these materials, especially in fields such as aerospace and medicine, ensuring greater durability and reliability of products. This scientific article explores the influence of deformation cutting on the microhardness and deformation strengthening of the surface layer of titanium alloys VT8 and VT1-0. The research aimed to determine the effectiveness of deformation cutting as a method for strengthening the surface layer of titanium alloys with different thermal conductivity. The novelty lies in studying the impact of deformation cutting on the microhardness and deformation strengthening of these alloys, comparing the effectiveness for alloys with different thermal conductivity, as well as establishing limitations and directions for further research. The results showed that deformation cutting leads to an increase in microhardness by 10–15% for VT8 and by 40% for VT1-0, explained by the difference in thermal conductivity of the alloys. For alloys with low thermal conductivity, such as VT8, additional sources of deformation or temperature influence are necessary to achieve greater strengthening. The practical significance lies in utilizing the research results to develop new technologies for strengthening the surface layer of titanium alloys with different properties. Thanks to this approach, the possibilities for strengthening materials will significantly expand, paving the way for the creation of new generations of strong and lightweight structures. Implementing these innovative methods may contribute to a revolution in manufacturing, reducing production costs and improving the environmental sustainability of processes.

Key words: deformation cutting, titanium alloys, microhardness, deformation strengthening, thermal conductivity.

Постановка проблеми

У сучасній промисловості велике значення має підвищення міцності поверхневого шару матеріалів, особливо тих, які не піддаються гартуванню. Це пов'язано з необхідністю забезпечення довговічності та надійності деталей машин, які працюють у складних умовах, таких як високі навантаження, абразивний знос, корозія та інші агресивні впливи.

Матеріали, які не піддаються гартуванню, можна класифікувати за різними критеріями, зокрема за хімічним складом, мікроструктурою, та за способами їх зміцнення. До таких матеріалів належать деякі види сталей (наприклад, аустенітні нержавіючі сталі), багато неферитних металів (мідь, алюміній, титан та їх сплави) та полімери. Аустенітні нержавіючі сталі не піддаються гартуванню через високий вміст нікелю, який стабілізує аустенітну фазу. Ці сталі використовуються для виготовлення харчового обладнання, хімічних реакторів, медичних інструментів, де важлива корозійна стійкість [1]. Крім того, алюмінієві сплави використовуються у авіаційній промисловості, автомобілебудуванні, велосипедному виробництві, а титанові сплави використовуються у виробництві імплантатів, літакових двигунів та космічної техніки [2].

Розглянемо способи підвищення міцності таких матеріалів [3]:

Хіміко-термічна обробка, яка полягає у насиченні поверхневого шару матеріалу хімічними елементами, такими як азот (нітрування), вуглець (цементация) або бор (борування), з подальшим охолодженням, що призводить до зміни структури та підвищення міцності поверхні.

Альтернативні термічні методи, такі як відпал, який зменшує внутрішні напруження, зерногранічне зміцнення або старіння, що призводить до випреципітації твердих фаз і зміцнення матеріалу.

Поверхнєве зміцнення, яке змінює лише поверхневий шар матеріалу, не впливаючи на його основні властивості. Це може бути лазерне або електронно-променеве зміцнення, анодування для алюмінієвих сплавів, хімічне або фізичне осадження з парової фази.

Методи, які змінюють мікроструктуру матеріалу через пластичну деформацію. Це може бути холодна обробка тиском, така як волочіння, прокатка або кування. При цьому відбувається накопичення дислокацій, що призводить до зміцнення матеріалу.

Проте суттєвими недоліками наведених методів є високі енерговитрати, значна тривалість процесу, складність обладнання та обмеження за товщиною зміцненого поверхневого шару. З цієї точки зору значну увагу викликають нові технологічні методи, які дозволяють отримати зміцнений поверхневий шар великої товщини з рівномірним розподілом властивостей, при цьому використовуючи універсальне обладнання з мінімальними витратами часу та енергії. Одним з таких методів є деформуюче різання, який може створювати регулярний зміцнений макрорельєф на зовнішній поверхні циліндричних заготовок для підвищення їхньої зносостійкості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Процес деформуючого різання реалізується за звичайними схемами точіння або стругання. Інструмент для цього процесу має спеціальну геометрію ріжучої частини. Отриманий регулярний макрорельєф представляє собою стружку, що залишилася з'єднаною з основним матеріалом заготовки. В зоні головної та допоміжної ріжучих кромки шар металу піддається пластичній деформації, що призводить до його зміцнення. Це призводить до утворення регулярного зміцненого поверхневого шару на зовнішній поверхні заготовки. Зміцнення поверхневого шару під час пластичної деформації відбувається за рахунок збільшення густини дислокацій у деформованому матеріалі. Також важливим є ефект розігріву шару оброблюваного матеріалу. При високій швидкості обробки матеріалів, що піддаються гартуванню, можуть досягатися температури, необхідні для структурно-фазового переходу, що призводить до формування загартованого зміцненого шару [4–5].

Розроблені донедавна методи деформаційного різання мають обмеження щодо формування мікрорельєфа на сталях, оскільки коефіцієнт відносного подовження для сталей повинен бути не менше 15–18% і твердість не більше 240НВ [6]. Більше того у аустенітних сталей з підвищенням температури зменшується коефіцієнт відносного подовження, що буде мати значний вплив на обмеження в умовах обробки при деформаційному різанні, зокрема на основні параметри процесу різання, такі як швидкість різання, подача та глибина різання [7]. Щодо інших груп матеріалів, які не піддаються гартуванню не достатньо досліджень для ґрунтовного розуміння механізму зміцнення поверхневого шару, його обмежень та визначення раціональних умов обробки та геометрії різально-деформуючого інструменту. На онові аналізу літературних джерел виявлено, що розширення способів зміцнення матеріалів, які не піддаються гартуванню є важливою науковою задачею.

Формулювання мети дослідження

На онові аналізу літературних джерел виявлено, що розширення способів зміцнення матеріалів, які не піддаються гартуванню є важливою науковою задачею. Метою дослідження є визначення ефективності деформуючого різання як методу зміцнення поверхневого шару титанових сплавів ВТ8 та ВТ1-0 з різною теплопровідністю.

Викладення основного матеріалу дослідження

Об'єктом дослідження обрано титановий сплав ВТ8 з хімічним складом, % (мас.): до 0,3Fe, до 0,1C, (0,2–0,4)Si, (2,8–3,8)Mo, до 0,05N, (5,8–7)Al, до 0,5Zr, до 0,15O, до 0,015H, основа – Ti та ВТ1-0 з хімічним складом, % (мас.): 0,25Fe, до 0,07C, до 0,1Si, до 0,04N, до 0,2O, до 0,001H, основа – Ti (99,24–99,7) [8]. Сплав ВТ8 відноситься до групи титанових сплавів зі структурою ($\alpha+\beta$), що деформуються і має високу межу міцності та достатню межу пластичності. ВТ1-0 класифікується як α -титан та має високу міцність при достатній пластичності та в'язкості, що підходить для обробки різанням.

Деформуюче різання проводилося на верстаті 16К20 на циліндричних зразках діаметром 50 мм твердосплавним різцем зі сплаву ВК8. Для деформаційної обробки використовувалися різні режими різання: $v = 30\text{--}100$ м/хв, $s = 0,05\div 0,2$ мм/об. Використовувалася постійна глибина різання $t = 0,5$ мм. Процес здійснюється без охолодження. Мікротвердість вимірювалася на мікротвердомір ПМТ-3М при навантаженні на індентор 25 г.

Показник деформаційного зміцнення поверхневого шару визначався за наступною залежністю [9]:

$$\delta_{\text{ц}} = (H_{\text{обр}} - H_{\text{вих}}) / H_{\text{вих}} \quad (1)$$

де $H_{\text{обр}}$ і $H_{\text{вих}}$ – відповідно твердість (мікротвердість) металу після і до обробки.

Для визначення середньої температури (температури різання) контактними поверхнями інструменту використовували метод природної термопари. Вимірювання термоЕДС проводилося 10÷15 с з початку різання. Для реєстрації значення термоЕДС застосовували струмознімач та цифровий мультиметр з точністю вимірювання до 0,1 мВ [10].

Експериментальні дослідження показали, що мікротвердість вихідного зразка становить HV360±20 для BT8 та HV180±20 для BT1-0. Залежність величини мікротвердості від режимів деформаційного різання наведена на рисунку 1.

Вимірювання після деформаційного різання показали незначне збільшення мікротвердості для BT8 на 10–15%, що становило HV390–400. Розрахунки показали, що показник деформаційного зміцнення не перевищує 0,15, що є низьким у порівнянні з BT1-0 мікротвердість якої збільшилась з HV180 у вихідної заготовки до HV250 після деформуємого різання, а показник деформаційного зміцнення не перевищує 0,4. Таку розбіжність можна пояснити суттєвою різницею (майже в 2 рази) у теплопровідності: $\lambda = 21,9$ Вт/(м·К) для BT1-0 та $\lambda = 10,4$ Вт/(м·К) для BT8 [8].

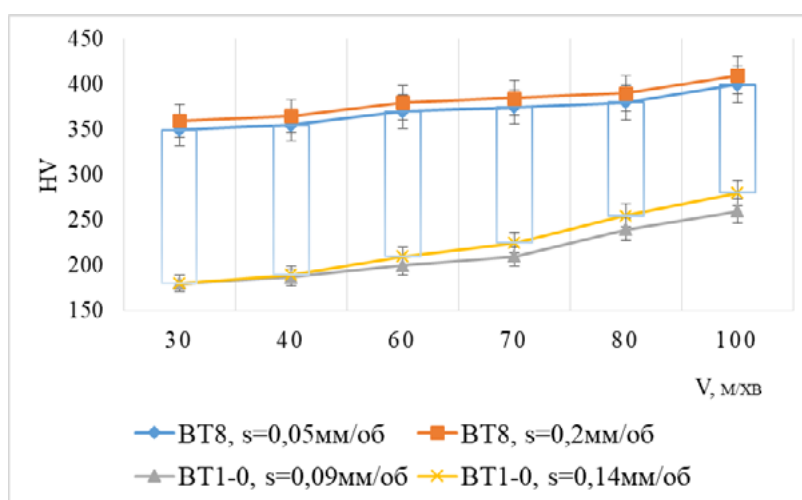


Рис. 1. Залежність мікротвердості від режимів деформаційного різання

В той же час в роботі [11], було проведено дослідження впливу деформаційного різання на зміцнення Сталі 40X ($\lambda = 46,3$ Вт/(м·К)), мікротвердість якої збільшилась з HV250 у вихідної заготовки до HV560 після деформуємого різання. Це можна пояснити тим, що під час обробки в зоні різання виникає значне тепловиділення, однак низька теплопровідність титанових сплавів призводить до того, що тепло, що виділяється в зоні різання, не може швидко відводитися від зони деформації в тіло заготовки, тим самим сповільнюючи процеси зменшення щільності дислокацій та фазового перетворення, що і призводить до менших значень мікротвердості.

Крім того, процес деформаційного різання для сталей проводиться на високошвидкісних режимах, в діапазоні 1–3 м/с [12]. Проте існують певні обмеження параметрів обробки титанових сплавів, які гуртуються на їх властивостях. Високошвидкісне різання може призвести до значного перегрівання матеріалу, і, як наслідок, зменшення міцності та твердості, утворення тріщин та погіршення якості поверхні.

При цьому температура різання залежить від потужності теплових джерел у зоні деформації та на передній поверхні інструменту, інтенсивності стоку тепла в деталь та інструмент. При різанні температура зростає зі збільшенням швидкості різання і розмірів шару, що зрізається. Однак їх вплив на температуру різання неоднаковий [13]. Зі зростанням швидкості різання середня температура контакту монотонно підвищується, асимптотично наближаючись до значення приблизно рівного температурі плавлення оброблюваного матеріалу.

Дослідження вимірювання температури в зоні різання наведено на рисунку 2.

Результати показали, що температура в зоні різання при обробці титанового сплаву BT8 вище ніж при обробці BT1-0, але не досягає температури фазових перетворень.

Основним недоліком експериментальних методів визначення температури в зоні різання є неможливість з їх допомогою отримати достовірні температурні поля окремо в стружці, деталі та ріжучому клині інструменту. В роботі [14] наведено розрахунки температурних полів для заготовки, яка оброблюється різанням; показано, що у зв'язку із низькою теплопровідністю більшість тепла згенерованого у процесі різання відводиться у стружку та різальний інструмент. Виходячи з цього для досягнення зміцнення поверхневого шару в заготовках з титану та титанових сплавів необхідні додаткові джерела деформації або температурного впливу. Подальшим кроком в дослідженні буде визначення комбінованих способів зміцнення.

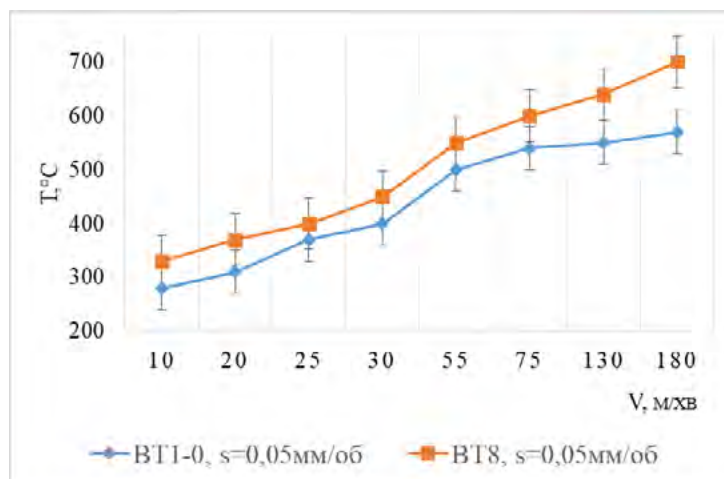


Рис. 2. Залежність температури в зоні різання від режимів деформаційного різання

Висновки

Дослідження підтвердило, що деформуюче різання впливає на зміцнення поверхневого шару титанових сплавів VT8 та VT1-0. Мікротвердість обох сплавів після такої обробки виявила приріст: на 10–15% для VT8 і на 40% для VT1-0.

Виявлено, що ефективність деформуючого різання визначається теплопровідністю сплаву. Низька теплопровідність, характерна для VT8, обмежує можливості зміцнення цим методом.

Для сплавів з низькою теплопровідністю, таких як VT8, рекомендується використання комбінації деформуючого різання з іншими методами зміцнення, щоб досягти більш виразного збільшення мікротвердості та деформаційного зміцнення.

Напрямки подальших досліджень будуть охоплювати розробку комбінованих методів зміцнення титанових сплавів та вивчення впливу деформуючого різання на інші їх властивості, такі як зносостійкість та корозійна стійкість. Очікується, що ці результати сприятимуть розвитку нових технологій зміцнення титанових сплавів, знайдуть застосування в різних галузях промисловості.

Список використаної літератури

- Liu S., Wan X., Hu C., Zhang Y., Ke R., Hu J., Deng X., Li G., Wu K. Probing the impact of grain size distribution on the deformation behavior in fine-grained austenitic stainless steel: A critical analysis of unimodal structure versus bimodal structure. *Materials Science and Engineering: A*. Vol. 897. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.146343>.
- Symonova A., Filippi E., Kmec J., Majerník J., Karková M. The mechanics of machining ultrafine-grained Ti-6Al-4Mo alloy processed severe plastic deformation. *Manufacturing technology*. 17(4). 2017. 592-597.
- Rajan T.V., Sharma C.P., Sharma A. Heat treatment principles and techniques. – Delhi, India: PHI Learning, 2011. 408 p.
- González G., Sauer F., Plogmeyer M., Gerstenmeyer M., Bräuer G., Schulze V. Effect of thermomechanical loads and nanocrystalline layer formation on induced surface hardening during orthogonal cutting of AISI 4140. *Procedia CIRP*. 2022. V. 108, pp 228-233. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.03.040>.
- Davis J.R. Surface hardening of steels understanding the basics. Materials Park, OH, USA: ASM International. 2002. 319 p.
- Guo Y.B., Janowski G.M. Microstructural characterization of white layers by hard turning and grinding. *Transactions of NAMRI/SME*. Vol. 32. 2004. 367–374.
- Cao S.C., Zhang X., Lu J. et al. Predicting surface deformation during mechanical attrition of metallic alloys. *Comput Mater*. 2019. V. 5 (36). <https://doi.org/10.1038/s41524-019-0171-6>
- Astarita A., Prisco U. Tensile properties of a hot stretch formed Ti-6Al-4V alloy component for aerospace applications. *Manufacturing Technology*. 2017. 17(2), 141-147.
- Погребна Н.Е., Куцова В.З., Котова Т.В. Способи зміцнення металів. Дніпро: НМетАУ. 2021. 89 с.
- Мазур М.П. Основи теорії різання матеріалів. Львів : Новий світ-2000. 2011. 422 с.
- Huseynov H. New Trends in Mechanical Engineering Technology. *Advances in Science and Technology*. 2024. <https://doi.org/10.4028/p-xvvnq0>

12. Kundrak J., Mamalis A.G., Gyani K., Bana V. Surface layer microhardness changes with high-speed turning of hardened steels. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 53 (1). 2011. 105–112.

13. Kónya G., Takács J., Miskolczi I., Kovács Z. Investigation of the effects of machining parameters on cutting conditions during orthogonal turning of austenite stainless steel. *Production Engineering Archives*. 30(1). 2024. 86-93. <https://doi.org/10.30657/pea.2024.30.8>

14. Patne H.P., Kumar A., Karagadde S., Joshi S.S. Modeling of temperature distribution in drilling of titanium. *International Journal of Mechanical Sciences*. Vol. 133. 2017. 598-610. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.09.024>.

References

1. Liu S., Wan X., Hu C., Zhang Y., Ke R., Hu J., Deng X., Li G., Wu K. (2024). Probing the impact of grain size distribution on the deformation behavior in fine-grained austenitic stainless steel: A critical analysis of unimodal structure versus bimodal structure. *Materials Science and Engineering: A*. Vol. 897. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.146343>.

2. Symonova A., Filippi E., Kmec J., Majerník J., Karková M. (2017). The mechanics of machining ultrafine-grained Ti-6Al-4Mo alloy processed severe plastic deformation. *Manufacturing technology*. 17(4). 592-597.

3. Rajan T.V., Sharma C.P., Sharma A. (2011). Heat treatment principles and techniques. – Delhi, India: PHI Learning. 408 p.

4. González G., Sauer F., Plogmeyer M., Gerstenmeyer M., Bräuer G., Schulze V. (2022). Effect of thermomechanical loads and nanocrystalline layer formation on induced surface hardening during orthogonal cutting of AISI 4140. *Procedia CIRP*. V. 108, pp 228-233. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.03.040>.

5. Davis J.R. (2002). Surface hardening of steels understanding the basics. Materials Park, OH, USA: ASM International. 319 p.

6. Guo Y.B., Janowski G.M. (2004). Microstructural characterization of white layers by hard turning and grinding. *Transactions of NAMRI/SME*. Vol. 32. 367–374.

7. Cao S.C., Zhang X., Lu J. et al. (2019). Predicting surface deformation during mechanical attrition of metallic alloys. *Comput Mater*. V. 5 (36). <https://doi.org/10.1038/s41524-019-0171-6>

8. Astarita A., Prisco U. (2017). Tensile properties of a hot stretch formed Ti-6Al-4V alloy component for aerospace applications. *Manufacturing Technology*. 17(2), 141-147.

9. Pogrebna N.E., Kucova V.Z., Kotova T.V. (2021). Sposoby zmicnennia metaliv [Methods of strengthening metals]. Dnipro: NMetAU. 2021. 89 p. [in Ukrainian].

10. Mazur M.P. (2011) Osnovy teorii rizannia materialiv [Fundamentals of the theory of cutting materials]. Lviv: Noviy svit-2000. [in Ukrainian].

11. Huseynov H. (2024). New Trends in Mechanical Engineering Technology. *Advances in Science and Technology*. <https://doi.org/10.4028/p-xvvnq0>

12. Kundrak J., Mamalis A.G., Gyani K., Bana V. (2011). Surface layer microhardness changes with high-speed turning of hardened steels. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 53 (1). 105–112.

13. Kónya G., Takács J., Miskolczi I., Kovács Z. (2024). Investigation of the effects of machining parameters on cutting conditions during orthogonal turning of austenite stainless steel. *Production Engineering Archives*. 30(1). 86-93. <https://doi.org/10.30657/pea.2024.30.8>

14. Patne H.P., Kumar A., Karagadde S., Joshi S.S. (2017). Modeling of temperature distribution in drilling of titanium. *International Journal of Mechanical Sciences*. Vol. 133. 598-610. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.09.024>.