

УДК 621.9.048.6

ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МЕТЧИКОВ ПРИ НАРЕЗАНИИ ВНУТРЕННИХ РЕЗЬБ МАЛОГО ДИАМЕТРА В ЗАГОТОВКАХ С ВЫСОКИМИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

© 2025 Р.В. Ладягин, В.В. Головкин

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 09.09.2025

Статья посвящена решению проблемы низкой работоспособности метчиков при нарезании внутренних резьб малого диаметра в заготовках из труднообрабатываемых материалов с высокими физико-механическими характеристиками (титановые сплавы, жаропрочные никелевые сплавы). Основные сложности связаны с повышенным износом инструмента, поломками метчиков и ухудшением качества обработанной поверхности. В качестве решения предложено применение ультразвуковых колебаний, интегрированных в процесс резбонарезания. Разработано специализированное устройство, оснащенное предохранительной муфтой и механизмом компенсации несоосности, что минимизирует риск поломок и повышает стабильность обработки. Экспериментальные исследования продемонстрировали, что использование ультразвука с амплитудой 5 мкм снижает крутящий момент в 1,5 раза за счет уменьшения сил трения и защемления зубьев метчика. Установлено, что метчики с покрытием из нитрида титана (TiN) обладают повышенной стойкостью по сравнению с метчиками без покрытия. Критический крутящий момент, приводящий к сколам, определен как 60–70% от момента объемного разрушения. Результаты работы имеют практическую значимость для машиностроения, позволяя повысить эффективность обработки резьб в высокопрочных материалах за счет оптимизации режимов ультразвукового воздействия и выбора защитных покрытий. Внедрение предложенной технологии способствует снижению затрат на инструмент и улучшению качества резьбовых соединений.

Ключевые слова: ультразвуковая обработка, резбонарезание, высокопрочные материалы, амплитуда колебаний, покрытие метчиков.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3(2)-307-313

EDN: TBBFAK

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для повышения эксплуатационных характеристик, срока службы и работоспособности изделий все чаще используют материалы с высокими физико-механическими характеристиками. Однако, применение указанных материалов вызывает серьезные проблемы при их механической обработке.[1-3] При этом имеет место низкая стойкость инструмента и даже случаются его поломки, а также возникают проблемы с обеспечением качества поверхностного слоя обрабатываемых заготовок [4-5].

Широкое использование в машиностроении резьбовых соединений, которые характеризуются универсальностью, многофункциональностью, прочностью и так далее, приводит к тому, что более 60% деталей машин имеют резьбу [6]. При этом процесс нарезания резьбы, особенно, малого диаметра в заготовках из труднообрабатываемых материалов приводит к сколам режущих зубьев метчиков и даже к их объемному разрушению.

Одним из возможных путей решения данной проблемы является применение комбинированных инструментов [7], а другим использование физико-механических методов обработки, в частности, нарезание резьбы с использованием энергии ультразвука [8]. Применение вынужденных ультразвуковых колебаний позволяет значительно уменьшить силы резания и трения в зоне обработки и тем самым повысить период стойкости метчиков, а также уменьшить сколы режущих зубьев и поломки метчиков.

Целью данной работы является исследование влияния ультразвуковых колебаний на работоспособность метчиков при нарезании резьбы в заготовках из труднообрабатываемых материалов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения исследования при нарезании внутренних резьб с ультразвуком были разработаны специальные ультразвуковые резбонарезные устройства [9].

Ладягин Роман Владимирович, аспирант, старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты». E-mail: ladoshman@yandex.ru

Головкин Валерий Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая и общая электротехника». E-mail: valeriiigolovkin1962@mail.ru

На рис. 1 показано нарезание резьбы метчиком с помощью специального ультразвукового устройства.

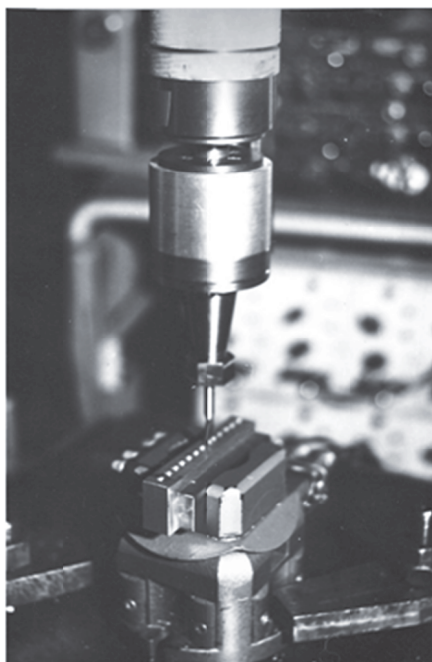


Рис. 1 Нарезание резьбы с применением специального ультразвукового устройства в отверстиях на специальных образцах

Для исключения поломок метчиков данное устройство оснащено предохранительной муфтой. Кроме того, в устройстве предусмотрена компенсация возможной несоосности метчика и обрабатываемого отверстия, а также несовпадения подачи станка и шага нарезаемой резьбы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 приведены осциллограммы крутящего момента при нарезании резьбы М8 в титановом сплаве ВТ9.

Обработка осуществлялась при следующих режимах резания: скорость резания $V = 1,2$ м/мин, подача $S = 1,25$ мм/об, технологическая среда – сульфорезол. При проведении исследования инструменту сообщались ультразвуковые колебания с частотой в диапазоне от 18 до 22 кГц и амплитудой равной 5 мкм.

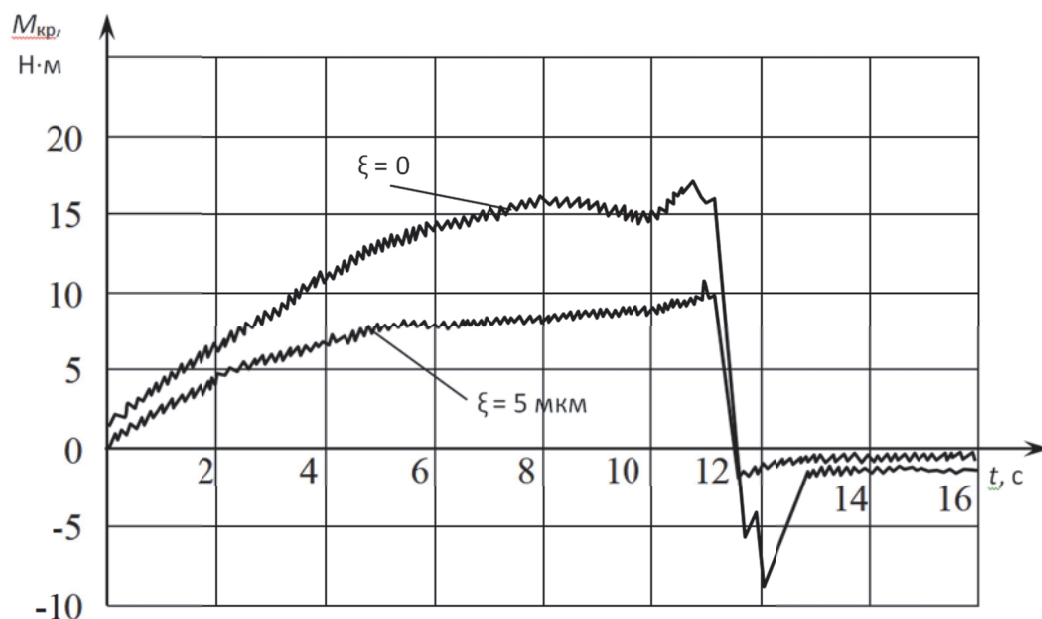


Рис. 2. Осциллограммы крутящего момента при нарезании резьбы М8 в титановом сплаве ВТ9

Из представленных осциллограмм видно, что в случае обработки с ультразвуковыми колебаниями с амплитудой 5 мкм значения крутящего момента резания в 1,5 раза меньше, чем при обработке без ультразвука. Снижение значений крутящего момента в основном связано с уменьшением сил трения и защемления зубьев метчика.

Также следует обратить внимание на то, что значительно уменьшается крутящий момент в начале вывинчивания метчика из отверстия при нарезании резьбы в глухих отверстиях.

Наличие резкого скачка крутящего момента в начале вывинчивания связано с попаданием оставшихся корней стружек и срезанной стружки под затылованные зубья метчика.

Значительное снижение крутящего момента (в 2,5 – 3 раза) позволяет избежать сколов режущих зубьев метчика и существенно увеличить период стойкости.

На рис. 3 показаны зависимости изменения крутящего момента резания в зависимости от количества обработанных отверстий.

Из приведённых зависимостей следует, что введение в зону резания ультразвуковых колебаний приводит к значительному увеличению периода стойкости метчиков, примерно, в 3-4 раза. Кроме того, нанесения на метчик износостойкого покрытия из TiN позволило дополнительно повысить стойкость метчиков в 1,5-2 раза. Так, например, применение метчиков с покрытием при обработке с воздействием ультразвука позволило увеличить период стойкости более чем в 5 раз.

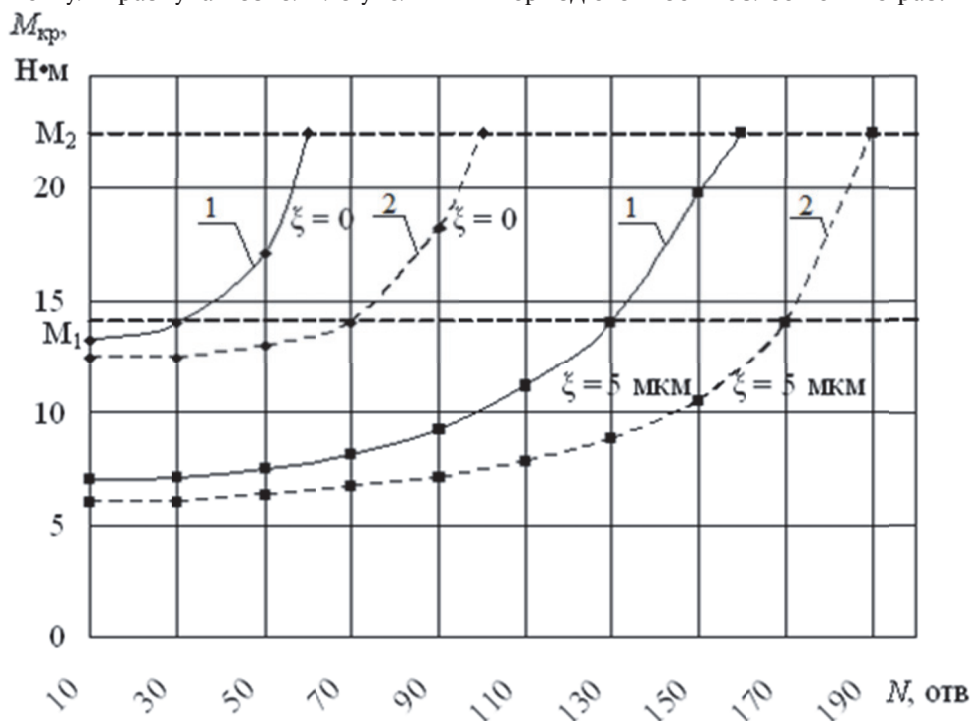


Рис. 3. Зависимости изменения крутящего момента резания в зависимости от количества обработанных отверстий:

1 – метчик без покрытия TiN; 2 – метчик с покрытием TiN; M_1 – крутящий момент, при котором происходит скол зубьев метчика; M_2 – крутящий момент, при котором происходит объемное разрушение метчика

Из представленных на рис. 4 зависимостей следует, что величина $M_{кр}$ возрастает с увеличением диаметра метчика. Наиболее существенный рост наблюдается при использовании традиционной технологии нарезания резьбы.

Результаты изучения влияния диаметра предварительного отверстия на величину крутящего момента приведены на рис. 5. Установлено, что увеличение диаметра отверстия под резьбу способствует снижению $M_{кр}$ на 20–30%.

На рис. 6 отражены данные по влиянию глубины нарезаемой резьбы на крутящий момент при обработке сплава ВТ9 для метчика М8. С увеличением глубины резьбы наблюдается рост крутящего момента, причем в условиях обычной обработки данный рост проявляется более интенсивно.

На рис. 7 представлены данные, характеризующие влияние амплитуды ультразвуковых колебаний на показатель стойкости метчиков различных типоразмеров.

Анализ данных показывает, что оптимальные значения амплитуды колебаний для метчиков М3 и М12 различаются. Это обусловлено тем, что хотя для снижения крутящего момента амплитуда должна быть максимальной, ключевым ограничивающим фактором является прочность зубьев ин-

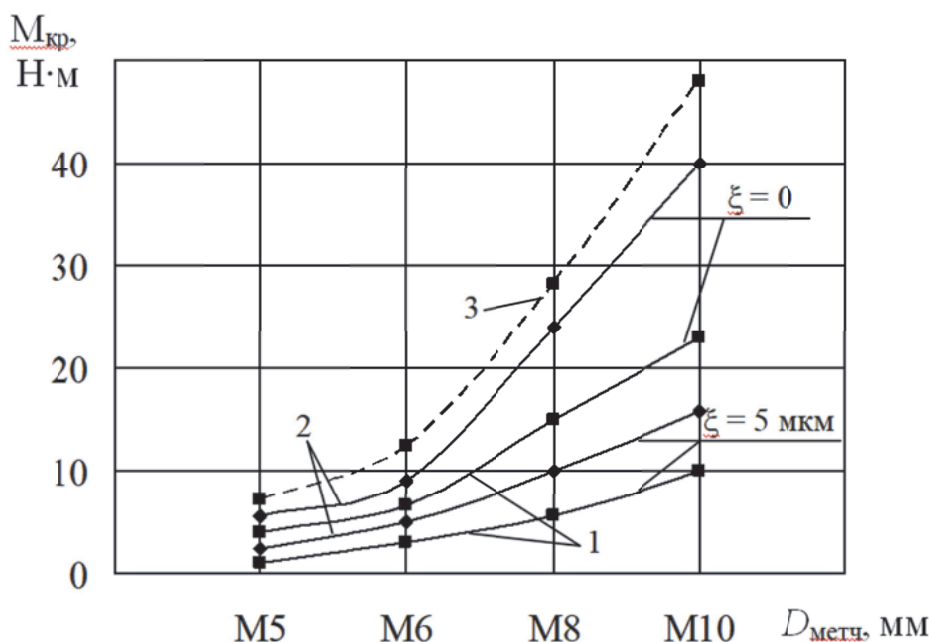


Рис. 4. Влияние типоразмера метчика на $M_{кр}$ при обработке сплава ВТ9 (ТС – сульфозфрезол):
1 – 1-ый метчик; 2 – 3-ий метчик; 3 – $M_{кр}$ разрушения метчика

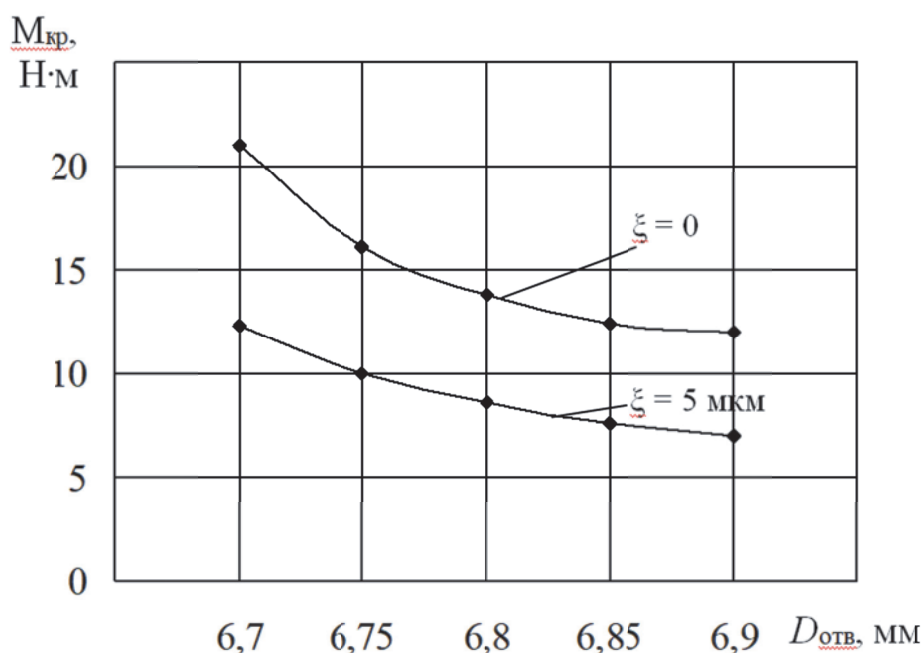


Рис. 5. Влияние диаметра отверстия на $M_{кр}$ при нарезании резьбы М8×1,25 третьим метчиком в сплаве ВТ9 (ТС – сульфозфрезол)

струмента. Поскольку прочностные характеристики метчиков разных типоразмеров варьируются, оптимальная амплитуда колебаний также должна подбираться индивидуально.

Например, для метчиков малых диаметров (М3–М6) рекомендуется устанавливать амплитуду в диапазоне 3–4 мкм, в то время как для метчиков М8–М12 допустимо использование амплитуды до 5 мкм.

На рис. 8 показано, как изменяется стойкость метчика М8×1,25 при обработке сплава ВТ9 в зависимости от диаметра подготовленного отверстия.

Как видно из графиков, увеличение диаметра отверстия способствует значительному повышению стойкости инструмента. Это связано с уменьшением толщины среза и, как следствие, снижением нагрузок на режущие кромки метчика.

На рис. 9 приведены результаты влияния заднего угла α на стойкость метчика при нарезании глухих резьб в накидных гайках из сплава ВТ9 метчиком М12.

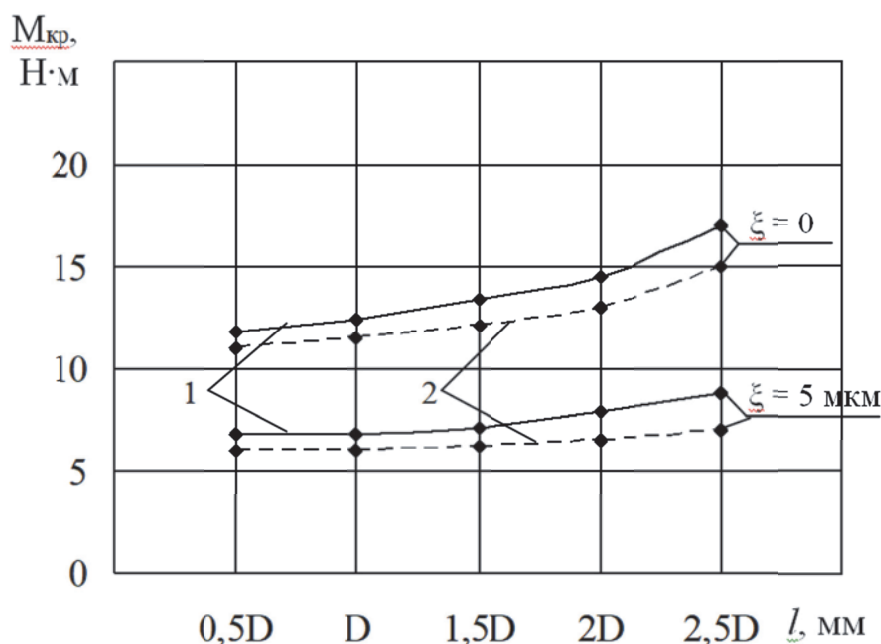


Рис. 6. Влияние глубины нарезаемой резьбы на $M_{кр}$ при обработке сплава ВТ9 полнопрофильным метчиком М8×1,25):
1 – 3-ий метчик без покрытия TiN; 2 – 3-ий метчик с покрытием TiN

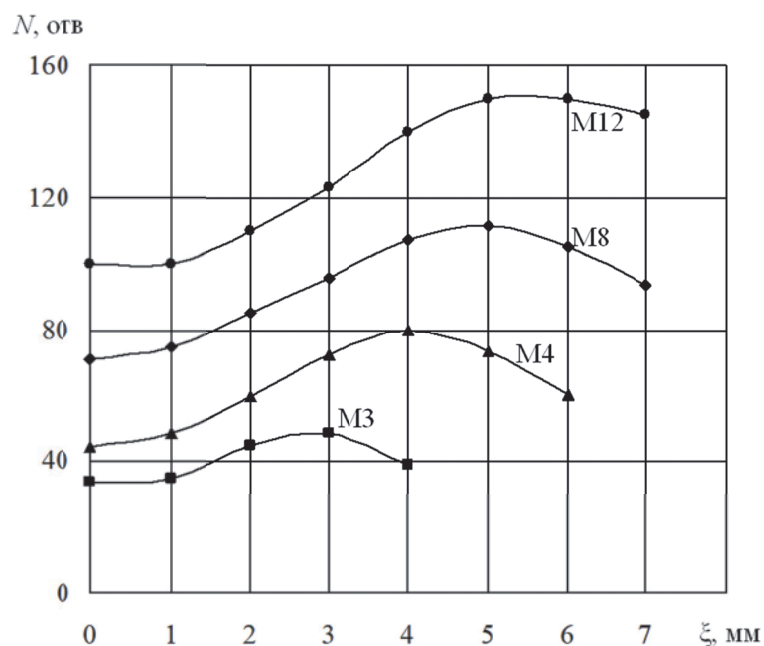


Рис. 7. Влияние амплитуды колебаний на стойкость метчиков (материал ВТ9, $V = 1,2$ м/мин, ТС-сульфофрезол)

Последний график показывает, что с увеличением заднего угла наблюдается снижение работоспособности инструмента. Это объясняется уменьшением прочности зуба, заклиниванием стружки в зоне резания, а также попаданием срезанного материала в область затылования зубьев.

ВЫВОДЫ

Введение в зону резания энергии ультразвука приводит к значительному уменьшению крутящего момента, что улучшает условия обработки и приводит к повышению работоспособности метчиков.

При нарезании резьбы метчиками в заготовках с высокими физико-механическими характеристиками применение ультразвуковых колебаний позволяет повысить работоспособность метчиков в 3-4 раза. Следует отметить, что при обработке метчиком с износостойким покрытием TiN стойкость увеличивается более чем в 5 раз по сравнению с нарезанием без покрытия и ультразвука.

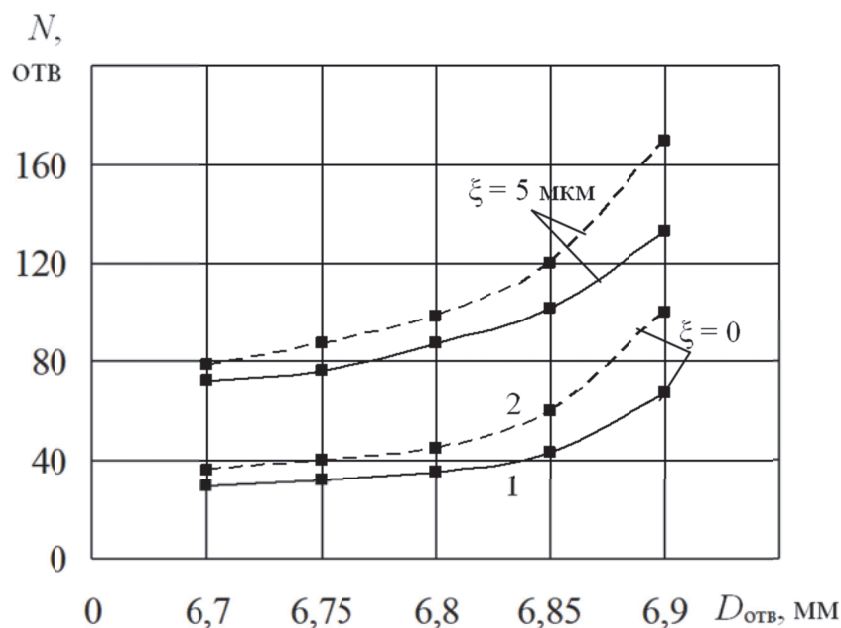


Рис. 8. Работоспособность метчиков в зависимости от диаметра отверстия под резьбу М8 (сплав ВТ9, ТС – сульфорезол):
1 – метчик без покрытия TiN; 2 – метчик с покрытием TiN

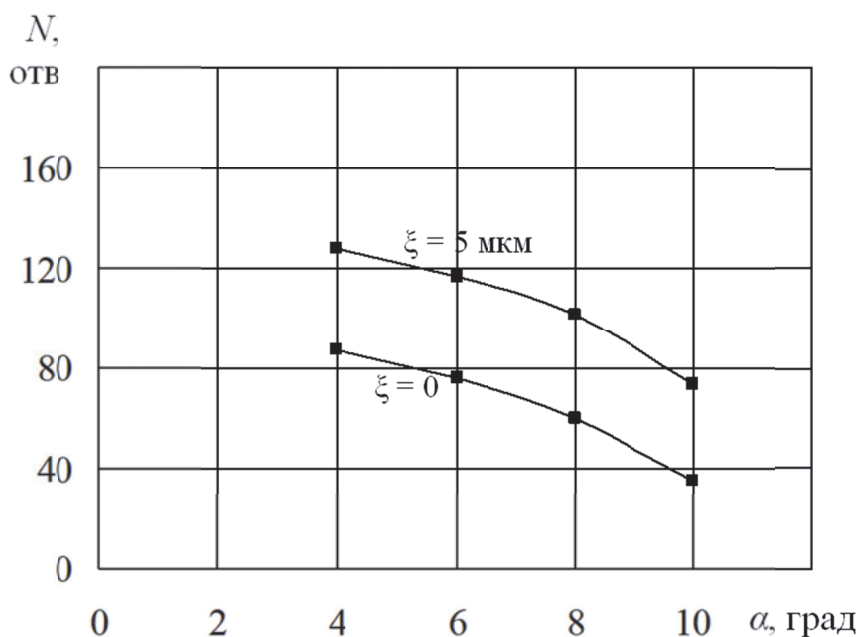


Рис. 9. Влияние заднего угла α на работоспособность метчика М12 (сплав ВТ9, ТС – сульфорезол)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тютюнников, Ю.М. Применение плазменно-механической обработки труднообрабатываемых материалов / Ю.М. Тютюнников // В книге: Энергия-2019. Материалы конференции: в 6 томах. – 2019. – С. 98.
2. Товстыко, А.Ю. Разработка прогрессивного инструмента обработки глубоких точных отверстий в труднообрабатываемых материалах / А.Ю. Товстыко // Наука и современность. – 2016. – № 44. – С. 84-89.
3. Москвитин, А.А. Экспериментальная оценка характеристик покрытий металлорежущего инструмента для обработки труднообрабатываемых материалов / А.А. Москвитин, А.Е. Губанов, Т.А. Дююн // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2017. – № 2. – С. 183-190.
4. Саблин, П.А. Управление шероховатостью поверхности при обработке заготовок из труднообрабатываемых и упрочненных материалов / П.А. Саблин, В.С. Щетинин, Б.Я. Мокрицкий, М.С. Юрченко // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2023. – Т. 19. – № 2(218). – С. 59-63.
5. Евченко, И.В. Обеспечение качества поверхности изделий из труднообрабатываемых материалов при электроэрозионной обработке / И.В. Евченко, И.Ю. Тюнина, А.Ю. Рязанцев // Ученые записки Крымского инже-

- нерно-педагогического университета. – 2024. – № 1(83). – С. 261-266.
6. Прокофьев, А.Н. Технологическое обеспечение качества резьбовых соединений / А.Н. Прокофьев, А.Е. Шешков // Научные технологии в машиностроении – 2012. – № 9(15). – С. 14-15.
 7. Prospects for the use of combined metal-cutting tools for threading. Kassenov A.Zh., Taskarina A.Zh., Mazdubay A.V., Abishev K.K., Suleimenov A.D. Science and Technology of Kazakhstan. 2024. № 3. С. 43-51.
 8. Golovkin V. V., Batishcheva O.M., Papshev V.A. Study on the Ultrasonic Vibration Impact on the Performance of Taps when Thread Cutting in Workpieces Made of Difficult-to-Machine Materials/ Lecture Notes in Mechanical Engineering C.109-114(2022) ISBN(softcover): 978-3-0357-1691-7 ISBN(eBook): 978-3-0357-2149-2.
 9. Головкин, В.В. Повышение эксплуатационных характеристик резьбовых деталей автомобилей путем применения ультразвуковых колебаний / В.В. Головкин, Е.П. Алексеев // В сб.: «Актуальные проблемы автотранспортного комплекса». – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2022. – С.21-25.

INCREASING THE PERFORMANCE OF TAPS WHEN CUTTING SMALL DIAMETER INTERNAL THREADS IN WORKPIECES WITH HIGH PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS

© 2025 R.V. Ladyagin, V.V. Golovkin

Samara State Technical University, Samara, Russia

The article is devoted to solving the problem of low performance of taps when cutting internal threads of small diameter in workpieces made of hard-to-machine materials with high physical and mechanical properties (titanium alloys, heat-resistant nickel alloys). The main difficulties include increased tool wear, tap breakage, and deterioration of surface quality. The proposed solution is to use ultrasonic vibrations integrated into the thread cutting process. A specialized device equipped with a safety clutch and a misalignment compensation mechanism has been developed, which minimizes the risk of breakage and increases the stability of processing. Experimental studies have demonstrated that the use of ultrasound with an amplitude of 5 μm reduces the torque by 1.5 times due to a decrease in friction and pinching forces of the teeth. It has been established that taps with a TiN coating have increased resistance compared to uncoated analogs. The critical torque leading to chipping is defined as 60–70% of the moment of volumetric destruction. It is shown that the optimal oscillation amplitude depends on the tap size: 3–4 μm is recommended for M3–M6, and 5 μm for M8–M12, which is due to differences in the strength of the teeth. The results of the work are of practical importance for mechanical engineering, allowing to increase the efficiency of thread processing in high-strength materials by optimizing the ultrasonic action modes and the choice of protective coatings. The implementation of the proposed technology helps to reduce tool costs and improve the quality of threaded connections.

Keywords: ultrasonic processing, thread cutting, hard-to-machine materials, oscillation amplitude, tap coating.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3(2)-307-313

EDN: TBBFAK

REFERENCES

1. Tyutyunnikov, Yu.M. Primenenie plazmenno-mekhanicheskoy obrabotki trudnoobrabatyvaemykh materialov / Yu.M. Tyutyunnikov // V knige: Energiya-2019. Materialy konferencii: v 6 tomah. – 2019. – С. 98.
2. Tovstyyko, A.Yu. Razrabotka progressivnogo instrumenta obrabotki glubokih tochnykh otverstij v trudnoobrabatyvaemykh materialah / A.Yu. Tovstyyko // Nauka i sovremennost'. – 2016. – № 44. – С. 84-89.
3. Moskvitin, A.A. Eksperimental'naya ocenka harakteristik pokrytij metallorazhushchego instrumenta dlya obrabotki trudnoobrabatyvaemykh materialov / A.A. Moskvitin, A.E. Gubanov, T.A. Duyun // Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova. – 2017. – № 2. – С. 183-190.
4. Sablin, P.A. Upravlenie sherohovatost'yu poverhnosti pri obrabotke zagotovok iz trudnoobrabatyvaemykh i uprochnennykh materialov / P.A. Sablin, V.S. Shchetinin, B.Ya. Mokrickij, M.S. Yurchenko // Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya. – 2023. – Т. 19. – № 2(218). – С. 59-63.
5. Evchenko, I.V. Obespechenie kachestva poverhnosti izdelij iz trudnoobrabatyvaemykh materialov pri elektroerozionnoj obrabotke / I.V. Evchenko, I.Yu. Tyunina, A.Yu. Ryazancev // Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta. – 2024. – № 1(83). – С. 261-266.
6. Prokof'ev, A.N. Tekhnologicheskoe obespechenie kachestva rez'bovykh soedinenij / A.N. Prokof'ev, A.E. Steshkov // Nauchnye tekhnologii v mashinostroenii – 2012. – № 9(15). – С. 14-15.
7. Prospects for the use of combined metal-cutting tools for threading. Kassenov A.Zh., Taskarina A.Zh., Mazdubay A.V., Abishev K.K., Suleimenov A.D. Science and Technology of Kazakhstan. 2024. № 3. С. 43-51.
8. Golovkin V. V., Batishcheva O.M., Papshev V.A. Study on the Ultrasonic Vibration Impact on the Performance of Taps when Thread Cutting in Workpieces Made of Difficult-to-Machine Materials/ Lecture Notes in Mechanical Engineering S.109-114(2022) ISBN(softcover): 978-3-0357-1691-7 ISBN(eBook): 978-3-0357-2149-2.
9. Golovkin, V.V. Povyshenie ekspluatatsionnykh harakteristik rez'bovykh detalej avtomobilej putem primeneniya ul'trazvukovykh kolebanij / V.V. Golovkin, E.P. Alekseev // V sb.: «Aktual'nye problemy avtotransportnogo kompleksa». – Samara: Samar. gos. tekhn. un-t, 2022. – С.21-25.

Roman Ladyagin, Postgraduate Student, Senior Lecturer of the Department of Technology of Mechanical Engineering, Machines and Tools. E-mail: ladoshman@yandex.ru

Valery Golovkin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Theoretical and General Electrical Engineering. E-mail: valeriigolovkin1962@mail.ru