

УДК 621.992
DOI

CC BY 4.0

СПОСОБ НАКАТЫВАНИЯ НАРУЖНЫХ УПОРНЫХ РЕЗЬБ НА ПОЛЫХ ЗАГОТОВКАХ

Афонин А. Н., Слободянский М. А., Лозовая С. Ю.

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Белгородский государственный национальный исследовательский университет», Белгород,
Российская Федерация, e-mail: aannru@yandex.ru*

Полые детали с тяжело нагруженными упорными резьбами, в частности детали, применяемые в нефтегазовой промышленности, имеют важное народнохозяйственное значение. Существующие технологии их изготовления не всегда обеспечивают требуемое качество, в связи с чем необходимо их совершенствование. В качестве наиболее рациональной технологии выбрана обработка пластическим деформированием, резьбонакатывание, однако традиционные методы накатывания не позволяют получать упорные резьбы. Целью исследования являлась разработка нового метода, позволяющего накатывать упорные резьбы на полых заготовках. При проведении исследований использовались основные положения теоретической механики, аналитической геометрии, теории пластичности и метод конечных элементов. Предлагаемый метод основан на принципе валковой штамповки. При его реализации полую заготовку устанавливают между тремя или большим количеством резьбонакатных роликов. В отверстие заготовки с одной стороны вводят оправку-дорн, а с другого торца заготовку подпирают плавающим упором. Оправка-дорн, перемещаясь в осевом направлении, раздвигает заготовку, а вращающиеся ролики препятствуют течению металла в радиальном направлении. Таким образом на заготовке формируются впадины накатываемой резьбы. Проведенное моделирование накатывания крупной упорной резьбы на полую заготовку методом конечных элементов в системе DEFORM 3D показало, что метод позволяет получать крупные упорные резьбы с полным заполнением профиля и в рассматриваемой модели признаки разрушения не выявлены. Применение предлагаемого способа позволит накатывать резьбу на полых заготовках. После отработки технологии способ предположительно может быть использован для изготовления прямоугольных, упорных и крупных трапециевидных резьб.

Ключевые слова: упорная резьба, накатывание, полая заготовка

METHOD FOR ROLLING EXTERNAL BUTTRESS THREADS ON HOLLOW WORKPIECES

Afonin A. N., Slobodyanskiy M. A., Lozovaya S. Yu.

*Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
“Belgorod State National Research University”, Belgorod, Russian Federation,
e-mail: aannru@yandex.ru*

Hollow parts with heavily loaded buttress threads, particularly those used in the oil and gas industry, are of significant economic importance. Existing manufacturing technologies do not always provide the required quality, necessitating improvement. Thread rolling, a plastic deformation process, was chosen as the most efficient option. However, traditional thread rolling methods do not produce buttress threads. The aim of the study was to develop a new method for rolling buttress threads on hollow workpieces. The research was carried out using the fundamental principles of theoretical mechanics, analytical geometry, plasticity theory and the finite element method. The proposed method is based on the principle of roll forging. It involves placing a hollow workpiece between three or more thread rolling rollers. A mandrel is inserted into the workpiece bore on one side, and a floating stop supports the workpiece on the other end. The mandrel, moving axially, expands the workpiece, while rotating rollers prevent metal flow in the radial direction. This creates the roots of the rolled threads on the workpiece. Finite element modeling of large-thrust thread rolling on a hollow workpiece using the DEFORM 3D system demonstrated that the method produces large-thrust threads with complete profile filling, and no signs of failure were detected in the model under study. The proposed method will enable thread rolling on hollow workpieces. Once the technology has been perfected, the method can be used to produce rectangular, buttress and large trapezoidal threads.

Keywords: buttress thread, rolling, hollow workpiece

Введение

Упорные резьбы нашли применение в технике для создания особо прочных резьбовых соединений, испытывающих преимущественно одностороннюю нагрузку. В частности, они используются для соединения труб нефтяного сортамента. Примерами таких резьб являются упорные резьбы обсадных труб по ГОСТ 632 (резьбы API Buttress) (рис. 1). Упорные резьбы при экс-

плуатации подвергаются значительным нагрузкам. Например, резьбовые соединения API Buttress нагружены как статическими, так и динамическими силами, которые появляются при спуске колонн в скважину, а у обсадных труб – также нагрузками, возникающими в процессе цементирования скважины при затвердевании цементного раствора. Действие осевых растягивающих сил вызывает нарушение герметичности колонны и разрыв резьбовых соединений.

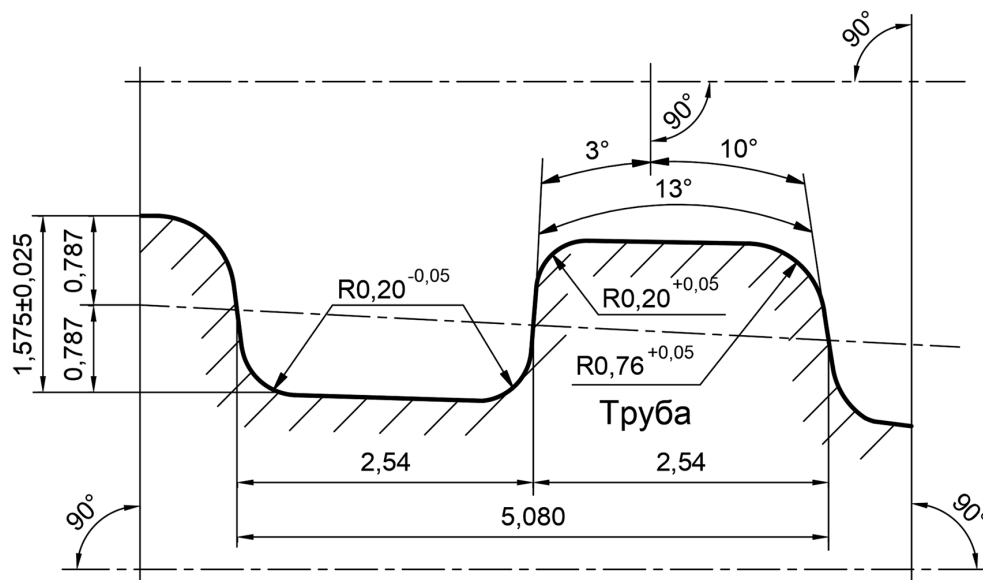


Рис. 1. Наружная резьба по ГОСТ 632
Примечание: составлен авторами на основе ГОСТ 632

Ситуацию усугубляют дополнительные изгибающие усилия, возникающие при искривлении или наклоне скважины. При этом длина спускаемого в нефтяную или газовую скважину лифта может достигать 2 км и более. Разрушение резьбового соединения в его составе приводит к авариям и требует проведения восстановительных работ, затраты на которые могут достигать нескольких миллионов рублей.

На сегодняшний день резьбы нефтяного сортамента получают путем многопроходного нарезания резьбовыми резцами или резьбовыми гребенками [1–3]. Данная технология имеет ряд существенных недостатков. Она отличается низкой производительностью и не способствует повышению прочности получаемой резьбы, в особенности усталостной. Так как нарезание резьбы резцами обычно осуществляется на незакаленных заготовках, после закалки точность и прочность резьбы значительно снижаются. Нарезанные резьбы также склонны при свинчивании-развинчивании к образованию задигов.

Определенный эффект по повышению эксплуатационных характеристик нарезанных резьб дает упрочнение их впадин поверхностным пластическим деформированием (обкаткой) [4–6], однако его все же следует признать недостаточным для тяжело нагруженных деталей [7]. Кроме того, введение дополнительных упрочняющих операций существенно повышает себестоимость изготовления изделий.

Многочисленными научными исследованиями [8, с. 63–79; 9, с. 638–654; 10, с. 137–150 и др.] и производственным опытом установлено, что высокое качество получаемой резьбы при высокой производительности обеспечивает метод обработки давлением – резьбонакатывание. Статическая и в особенности усталостная прочность накатанных резьб существенно выше, чем у нарезанных. По точности накатанные резьбы тоже превосходят нарезанные. Однако обработка накатыванием резьб нефтяного сортамента вызывает значительные технологические трудности [11–13]. Накатывание упорных резьб типа API Buttress традиционными методами практически невозможно из-за малого угла наклона одной из боковых сторон (3°), препятствующего течению металла в радиальном направлении из впадины в выступ.

Цель исследования – разработка нового метода обработки давлением, позволяющего накатывать упорные и прямоугольные резьбы на полых заготовках.

Материалы и методы исследования

При проведении исследований использовались основные положения теоретической механики, аналитической геометрии, теории пластичности и метод конечных элементов.

Результаты исследования и их обсуждение

Для получения наружных прямоугольных и упорных резьб пластическим де-

формированием ранее был предложен способ [14], основанный на принципе валковой штамповки. Валковая штамповка [15, с. 77–84] – это технология получения цилиндрических деталей, имеющих ступени различной формы, обработкой давлением. Формообразование деталей валковой штамповкой производится путем деформирования заготовки пуансоном в роликовой матрице, представляющей собой несколько вращающихся роликов.

Способ [14] осуществляется следующим образом.

Цилиндрическая заготовка, диаметр которой под резьбу равен внутреннему диаметру накатываемой резьбы, устанавливается в двух втулках между тремя или большим количеством роликов одного диаметра. Правый торец заготовки деформируется пуансоном с силой P . Для того, чтобы компенсировать осевую силу P , левый торец поджимается плавающим упором с силой $P_1 = P$. Ролики вращаются со скоростью V . Одновременно в полости левого и право-

го гидроцилиндров подается жидкость под давлением p . Под действием сил P и P_1 заготовка начинает деформироваться, увеличиваясь в диаметре. Выступы резьбы роликов препятствуют течению металла заготовки в радиальном направлении и формируют впадины резьбы на накатываемой заготовке. При этом за счет сил трения между заготовкой и вращающимися роликами ей также сообщается некоторое вращательное движение V_3 . Таким образом, на заготовке формируется винтовой профиль накатываемой резьбы.

Способ [14] позволяет накатывать прямоугольные и упорные резьбы только на цельных заготовках. У полых заготовок при таком деформировании металл будет течь внутрь отверстия и формирования полного профиля резьбы не произойдет. Для полых деталей предлагается использовать новый способ, показанный на рис. 2. На верхней половине рис. 2. изображена заготовка до накатывания резьбы, а на нижней половине – после.

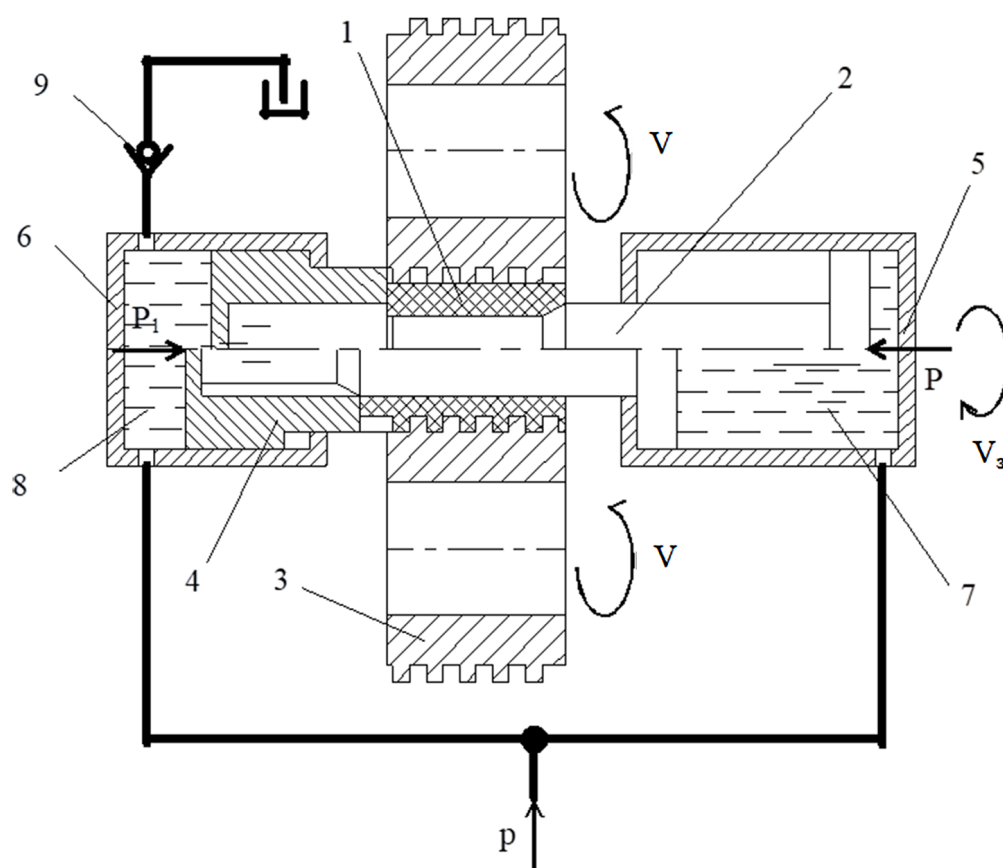


Рис. 2. Схема накатывания упорной резьбы на полую заготовку:
1 – деталь; 2 – оправка-дорн; 3 – резьбонакатные ролики; 4 – плавающий упор;
5, 6 – гидроцилиндры; 7, 8 – поршневые полости гидроцилиндров; 9 – клапан
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Предлагаемый технологический процесс осуществляется следующим образом:

В качестве заготовки используется цилиндрическая труба с наружным диаметром под резьбу, равным внутреннему диаметру получаемой резьбы. Заготовка устанавливается на оправку-дорн 2. Вокруг оправки находятся несколько цилиндрических резьбонакатных роликов 3. Оси вращения роликов и заготовки параллельны. Ролики вращаются с одинаковой скоростью с помощью привода станка (на схеме не показан).

Оправка-дорн состоит из двух ступеней. Диаметр меньшей базирующей ступени равен диаметру начального отверстия в заготовке d_n . Диаметр большей деформирующей ступени равен диаметру отверстия в готовой детали d_0 . Между ступенями имеется деформирующий конус.

Перед началом обработки заготовка устанавливается на базирующей ступени оправки-дорна. Ее левый торец фиксируется с помощью плавающего упора 4.

Известно, что при накатывании резьбы заготовка всегда получает осевое перемещение в связи с тем, что из-за подъема металла у нее будет меняться средний диаметр и, следовательно, угол подъема резьбы [16, с. 31–33]. Для заданных геометрических параметров получаемой резьбы регулировка направления осевого перемещения осуществляется за счет изменения диаметра резьбонакатных роликов. Диаметр роликов рассчитывается по формуле

$$D_{\text{нар}} = (k_{\text{рол}} / k_{\text{дет}}) d_{\text{заг}}, \quad (1)$$

где $k_{\text{рол}}$ – количество заходов резьбы на ролик, определяется конструктивно, исходя из необходимой прочности роликов и параметров резьбонакатного оборудования;

$k_{\text{дет}}$ – количество заходов резьбы на накатываемой детали;

$d_{\text{заг}}$ – наружный диаметр заготовки под резьбу. Для рассматриваемого способа равен внутреннему диаметру накатываемой резьбы, мм.

Благодаря этому заготовка будет вывинчиваться из роликов только в сторону плавающего упора. В противном случае заготовка упрется в деформирующий конус оправки-дорна и произойдет разрушение витков формируемой резьбы.

Оправка-дорн и плавающий упор работают как поршни гидроцилиндров 5 и 6. Полости 7 и 8 этих гидроцилиндров соединены с гидросистемой станка (на схеме не показана) таким образом, чтобы обеспечить в их равное давление масла. Так как внутренние диаметры гидроцилиндров одинаковы, силы P и P_1 , действующие на оправку-дорн

и плавающий упор, также будут равны. Полость 8 имеет слив через клапан 9, который открывается, если давление в этой полости будет больше, чем значение:

$$p = P_1 / F_1 \zeta, \quad (2)$$

где F_1 – площадь поперечного сечения полости 8 гидроцилиндра 6;

ζ – коэффициент полезного действия гидроцилиндра.

Заготовка, оправка-дорн и плавающий упор могут свободно вращаться вокруг своей оси.

При накатывании резьбы ролики, как было указано выше, вращаются с одинаковой скоростью V . С помощью гидросистемы станка в полости обоих гидроцилиндров подается масло под давлением p . В результате этого оправка-дорн внедряется в отверстие заготовки, деформируя его конусом с силой P . Как следствие, отверстие заготовки увеличивается от первоначального диаметра d_n до окончательного d_0 . Увеличение внутреннего диаметра заготовки ведет к росту наружного, однако выступы резьбы роликов препятствуют радиальному течению металла. Таким образом, металл заготовки имеет возможность течь только под впадинами резьбы роликов. При этом ролики благодаря трению сообщают заготовке вращение со скоростью V_3 . Вследствие этого за счет радиального течения металла на заготовке формируется винтовая резьба.

Так как диаметр роликов рассчитан по формуле (1), заготовка при формировании на ней резьбы будет постоянно вывинчиваться из них в сторону плавающего упора. В связи с этим давление масла в полости 8 станет больше, чем значение p . Клапан 9 откроется, и масло из полости 8 через него пойдет на слив, позволяя плавающему упору перемещаться влево на величину осевого смещения заготовки.

Когда оправка-дорн своей деформирующей частью пройдет все отверстие в заготовке, весь металл переместится в радиальном направлении и на заготовке будет сформирован полный профиль резьбы. На этом процесс получения резьбы завершается и заготовка снимается с оправки-дорна.

Так как окончательные размеры резьбы и диаметр отверстия в готовой детали задаются конструктором и известны заранее, объем деформируемого материала и, следовательно, степень заполнения металлом накатываемого резьбового профиля при рассматриваемом способе будет зависеть от начального размера отверстия в заготовке.

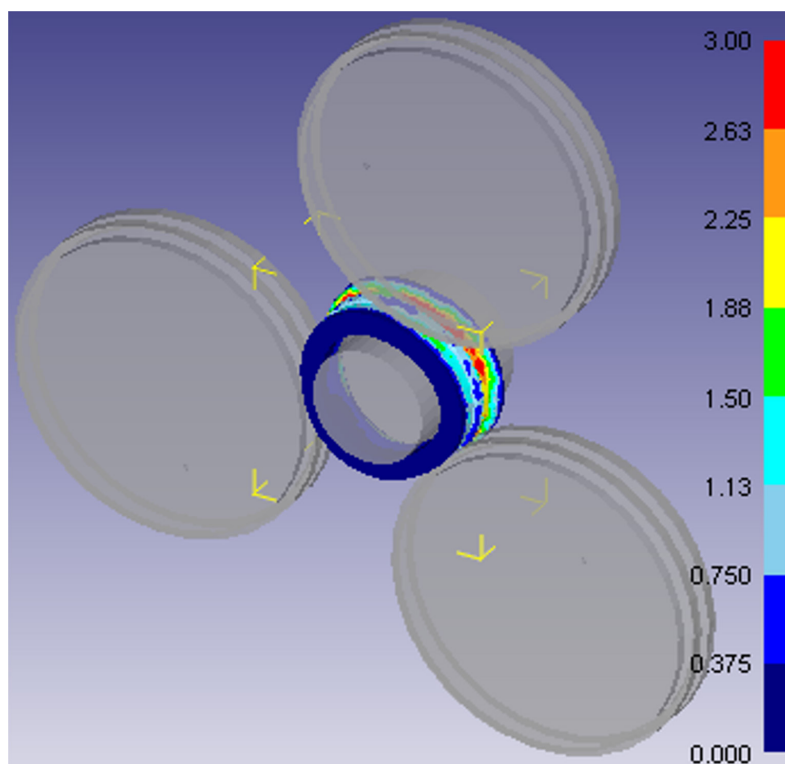


Рис. 3. Эквивалентные деформации при накатывании упорной резьбы на полую заготовке
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Начальный диаметр отверстия в заготовке до деформирования ориентировочно можно рассчитать по формуле

$$d_n = \sqrt{D_1^2 - D_2^2 + d_0^2} \quad (3)$$

где D_2 – средний диаметр резьбы, мм;

D_1 – внутренний диаметр резьбы, мм;

d_0 – диаметр отверстия в готовой детали, мм.

Начальный диаметр отверстия в заготовке также зависит и от механических свойств ее материала и уточняется экспериментальным путем на основе анализа полноты профиля получаемой при накатывании резьбы. В случае неполного профиля начальный диаметр отверстия уменьшают. При переполнении профиля – увеличивают.

Если резьба занимает не всю наружную поверхность заготовки, отверстие в заготовке делается ступенчатым, где диаметр d_n будет только у ступени под резьбой, а в остальных местах отверстие будет иметь диаметр d_0 .

При накатывании резьб предлагаемым способом могут использоваться модернизированные многороликовые машины для валковой штамповки [15, с. 79–80], тяжелые резьбонакатные станки [8, с. 79–107],

имеющие дополнительные гидравлические цилиндры, а также гидравлические прессы, оснащенные специальными накатными устройствами.

Для оценки практической реализуемости предлагаемого способа получения упорных резьб на полых заготовках было проведено компьютерное моделирование процесса методом конечных элементов [17] в системе DEFORM 3D. Моделировалось накатывание одного витка резьбы шагом 6 мм на заготовке диаметром 50 мм из стали 45 тремя роликами диаметром 100 мм. Заготовка при моделировании оставалась неподвижной, а все движения сообщались инструментам.

Результаты моделирования представлены на рис. 3. С помощью моделирования установлено, что метод позволяет получать крупные упорные резьбы с полным заполнением профиля и без опасности их разрушения. Накатывание при этом целесообразно производить шестью роликами, так как при меньшем количестве роликов возможно возникновение огранки заготовки.

Заключение

Проведенные исследования показали возможность применения предлагаемого

способа для накатывания упорных резьб на полых заготовках.

Поскольку предлагаемый способ требует применения сложного нестандартного оборудования, себестоимость получаемых с его помощью резьбовых изделий предположительно будет достаточно высока.

В связи с этим можно сделать вывод о том, что его целесообразно будет использовать для изготовления крупных тяжело нагруженных резьб на ответственных деталях, например на трубах и переходниках нефтяного сортамента.

Список литературы

1. Песин М. В., Павлович А. А., Мельников С. А. Особенности процесса резбонарезания на бурильных трубах // *Master's Journal*. 2020. Vol. 2. P. 30–34. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44602321> (дата обращения: 17.04.2026).
2. Степанчукова А. В. Обзор современных мировых технологий изготовления труб, применяемых в геолого-разведочном бурении // *Шаг в науку*. 2021. № 1. С. 98–101. http://sts.osu.ru/numbers/Step_to_science_1_2021.pdf (дата обращения: 17.04.2026).
3. Schurov A. I., Nemitova E. V., Schurova A. V., Ardashev D. V. Metric Buttress Thread Milling and Turning on CNC Machines // *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. 2018. Vol. 15. Is. 2. P. 5146–5160. URL: <https://journal.ump.edu.my/ijame/article/view/7> (дата обращения: 17.04.2026).
4. Корепанова К. С., Макаров В. Ф., Песин М. В. Повышение качества поверхности резьбы путем упрочняющей обработки // *Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации*. 2020. Т. 2. С. 155–158. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44802270> (дата обращения: 17.04.2026).
5. Hongwei Liu, Renke Kang, Xianglong Zhu, Zhigang Dong, Zhipeng Xu, Yali Song. Study on the effect of surface rolling process on fatigue behavior and surface integrity of 300M steel thread root // *Journal of Materials Research and Technology*. 2025. Vol. 38. P. 5996–6010. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785425022021> (дата обращения: 17.04.2026). DOI: 10.1016/j.jmrt.2025.08.246.
6. Xuanyu Liu, Lei Li, Haonan Kang, Xiaodong Zheng. Optimization of ultrasonic rolling parameters act on thread root and its influence on the fatigue life of bolts // *International Conference on Information Technology, Education and Management Innovation*. 2026. Vol. 83. URL: <https://www.scilit.com/publications/6fc13c602e7eae4a7de9221beabd5d18> (дата обращения: 17.04.2026). DOI: 10.1051/itmconf/20268301018.
7. Сахаутдинов Т. И., Песин М. В. Анализ технологических методов повышения сопротивления усталости резьбовых соединений деталей бурового оборудования // *Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромышленного оборудования*. 2023. Т. 1. С. 208–211. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=57181374> (дата обращения: 17.04.2026).
8. Киричек А. В., Афонин А. Н. Резбонакатывание. Библиотека технолога. М.: Машиностроение. 2009. 312 с. ISBN 978-5-94275-428-0.
9. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 2. Под ред. А. С. Васильева, А. А. Кутина. 6-е изд. М.: Инновационное машиностроение, 2018. 818 с. ISBN 978-5-6040281-7-9.
10. Jianli Song, Zhiqi Liu, Yongtang Li. Cold Rolling Precision Forming of Shaft Parts. Springer. 2017. 288 P. ISBN 978-3-662-54046-6, 978-3-662-54048-0.
11. Киричек А. В., Афонин А. Н. Накатывание резьб нефтяного сортамента // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2009. № 7. С. 7–11. URL: https://www.mashin.ru/files/2009/utp_07_2009.pdf (дата обращения: 17.04.2026).
12. Куц В. В., Зубков Д. А. Анализ схем движения накатного ролика при накатывании внутренней замковой конической резьбы // *Современные материалы, техника и технологии*. 2022. № 1 (40). С. 17–19. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48686050> (дата обращения: 17.04.2026).
13. Расулов Н. М., Надилов У. М. Обеспечение качества накатанных на трубах конических трубных резьб с управлением кинематических технологических связей // *Вестник машиностроения*. 2023. № 11. С. 902–905. URL: https://www.mashin.ru/eshop/journals/vestnik_mashinostroeniya/2030/26/ (дата обращения: 17.04.2026). DOI: 10.36652/0042-4633-2023-102-11-902-905.
14. Киричек А. В., Афонин А. Н., Афанасьев Б. И. Способ накатывания наружных прямоугольных резьб // *Известия ОрелГТУ. Машиностроение. Приборостроение*. 2006. № 2. С. 57–59. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=13040942> (дата обращения: 17.04.2026).
15. Голенков В. А., Радченко С. Ю. Технологические процессы обработки металлов давлением с локальным нагружением заготовки. М.: Машиностроение, 1997. 226 с. ISBN 5-217-02873-4.
16. Писаревский М. И. Новый инструмент для накатывания резьб и шлицев. Л.: Машиностроение, 1966. 150 с.
17. Kukielka L., Patyk R. M., Kulakowska A., Kałduński P. R., Kukielka K. M. Prediction of the metric thread quality after axial thread rolling process on cold using of finite element methods // *AIP Conference Proceedings* 2019. Vol. 2078. URL: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article/2078/1/020076/598024/Prediction-of-the-metric-thread-quality-after?searchresult=1> (дата обращения: 17.04.2026). DOI: 10.1063/1.5092079.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.