

УДК 621.99  
DOI 10.17513/snt.40057

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАКАТЫВАНИЯ КРУПНЫХ ТРАПЕЦЕИДАЛЬНЫХ РЕЗЬБ С ПОМОЩЬЮ КОМБИНИРОВАННОЙ РЕЖУЩЕ-ДЕФОРМИРУЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ

**Афонин А.Н., Шкарлет С.А., Лозовая С.Ю.**

*ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»,  
Белгород, e-mail: afonin@bsu.edu.ru*

Целью данного исследования является повышение эффективности получения крупных трапецеидальных резьб применением режущо-деформирующей обработки. Установлено, что достижение поставленной цели возможно путем выбора схемы деформирования, определяющей порядок перемещения материала из впадины резьбы в выступ. Для определения рациональной схемы деформирования проведен вычислительный эксперимент по моделированию режущо-деформирующей обработки методом конечных элементов с помощью системы автоматизированного проектирования DEFORM 3D. В результате проведенного моделирования для разных схем деформирования получены сведения о значениях нормализованного критерия разрушения Кокрофта – Лейтема и эквивалентных деформаций в заготовках из наиболее часто применяемых для изготовления крупных резьб трапецеидального профиля из сталей 45, 40X и ШХ15. Анализ результатов вычислительного эксперимента позволил определить ориентировочные области рационального применения рассмотренных схем деформирования. Данные результаты позволяют утверждать, что угловую схему деформирования для достижения наибольшей глубины упрочнения резьбы, а для повышения стойкости резьбонакатного инструмента целесообразно использовать возвратную схему. Предложены рекомендации по назначению размеров предварительно прорезаемой винтовой канавки для различных схем деформирования и материалов заготовки, то есть распределению припуска под предварительное нарезание и последующее накатывание резьбы.

**Ключевые слова:** трапецеидальная резьба, накатывание, схема деформирования, режущо-деформирующая обработка

## INCREASING THE EFFICIENCY OF ROLLING LARGE TRAPEZOIDAL THREADS USING A COMBINED CUTTING – DEFORMING PROCESSING

**Afonin A.N., Shkarlet S.A., Lozovaya S.Yu.**

*Belgorod State National Research University, Belgorod, e-mail: afonin@bsu.edu.ru*

The purpose of the study is to increase the efficiency of obtaining large trapezoidal threads using combined cutting and deforming processing. A conclusion is drawn about the importance of choosing a rational deformation scheme that determines the order of material movement from the thread root to the protrusion. To determine a rational deformation scheme, a computational experiment was carried out to simulate the process of cutting-deforming processing using the finite element method using the DEFORM 3D computer-aided design system. As a result of the simulation, the fields of distribution of equivalent strains and the normalized Cockcroft-Latham failure criterion were obtained in workpieces made from steels 45, 40X and ShKh15, which are most often used for the manufacture of large trapezoidal threads, during cutting-deformation processing of trapezoidal threads with different deformation patterns. Analyzing the of calculation results, it became possible to determine the approximate areas of rational application of the considered deformation schemes. In particular, it has been established that in order to achieve the greatest depth of thread hardening, it is recommended to use an angular deformation scheme, and to increase the durability of thread rolling tool, it is recommended to use a return scheme. Recommendations are proposed for assigning the dimensions of a pre-cut helical groove for various deformation schemes and workpiece materials, that is, the distribution of allowance for preliminary cutting and subsequent thread rolling.

**Keywords:** trapezoidal thread, rolling, cutting-deformation processing, deformation schemes

В транспортном машиностроении, горно-металлургической промышленности и других отраслях народного хозяйства широкое применение находят крупные трапецеидальные резьбы. По сравнению с другими типами резьб они обладают повышенной прочностью и износостойкостью. Однако, технологические процессы их изготовления вызывают значительные трудности. На сегодняшний день основной технологией получения крупных трапецеидальных резьб

является лезвийная обработка резанием с последующим резьбошлифованием. Такая технология является малопроизводительной и не всегда позволяет обеспечить высокие требования к качеству резьбы. Известно, что наиболее эффективным способом получения резьб является накатывание [1, 2], однако для получения крупных трапецеидальных резьб оно практически не применяется. Накатывание крупных трапецеидальных резьб может приводить к разрушению за-

готовки из-за значительных деформаций в зоне накатывания, приводящих к исчерпанию запаса пластичности материала. Избежать исчерпание запаса пластичности можно, уменьшив объем деформируемого металла за счет применения комбинированной режущо-деформирующей обработки (РДО) [3, 4], представляющей собой накатывание резьбы по предварительно нарезанной на заготовке винтовой канавке. Однако, в настоящее время этот способ получения резьб еще слабо изучен, что сдерживает его применение в промышленности. В частности, не изучено влияние на напряженно-деформированное состояние заготовки схемы деформирования, определяющей порядок перемещения материала при накатывании из впадины резьбы в выступ.

Целью исследования является повышение эффективности получения крупных резьб с трапецидальным профилем путем применения комбинированной РДО. Достижение поставленной цели предполагается за счет выбора рациональной схемы деформирования, обеспечивающей наилучшие условия для протекания пластической деформации при накатывании.

#### Материалы и методы исследования

Для достижения поставленной цели были изучены известные схемы деформирования при РДО резьб с трапецидальным профилем [5] (рис. 1). Получение той или иной схемы деформирования при РДО резьб обеспечивается за счет формы предварительно прорезанной винтовой канавки и формы витков резьбонакатного инструмента.

Моделирование процесса РДО выполнено с использованием метода конечных элементов (МКЭ) [6, 7] в пакете прикладных программ DEFORM 3D. При моделировании для сокращения времени расчета рассматривалось накатывание двух кольцевых канавок на одной четверти заготовки. Предварительное нарезание канавки не моделировалось, поскольку технологическая наследственность после него не оказывает существенного влияния на состояние материала заготовки [8]. В качестве материала заготовки рассматривались стали 45, 40Х и ШХ15, наиболее широко применяемые для изготовления крупных трапецидальных резьб. В качестве критерия разрушения материала накатываемой резьбы был принят нормализованный критерий Кокрофта – Лейтема [9].

#### Результаты исследования и их обсуждение

Установлено, что разница между силами, полученными при вычислительном и натурном [1] экспериментах, не превышает 10%, что подтверждает адекватность разработанной конечноэлементной модели.

Рассмотрим в качестве примера полученные в результате проведенного вычислительного эксперимента поля эквивалентных деформаций при РДО с разными схемами деформирования резьбы трапецидального профиля шагом 6 мм на заготовках диаметром 40 мм, изготовленной из углеродистой стали 45, которая является эталонным материалом в машиностроении. Данные результаты приведены на рис. 2.

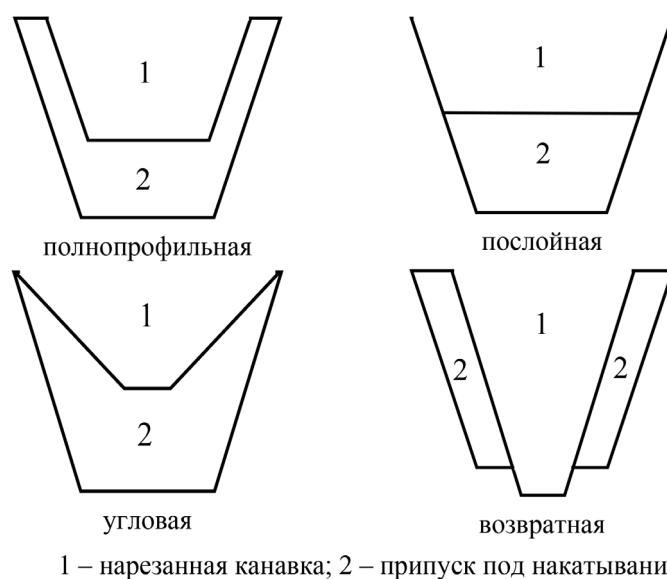


Рис. 1. Схемы деформирования при РДО резьб с трапецидальным профилем

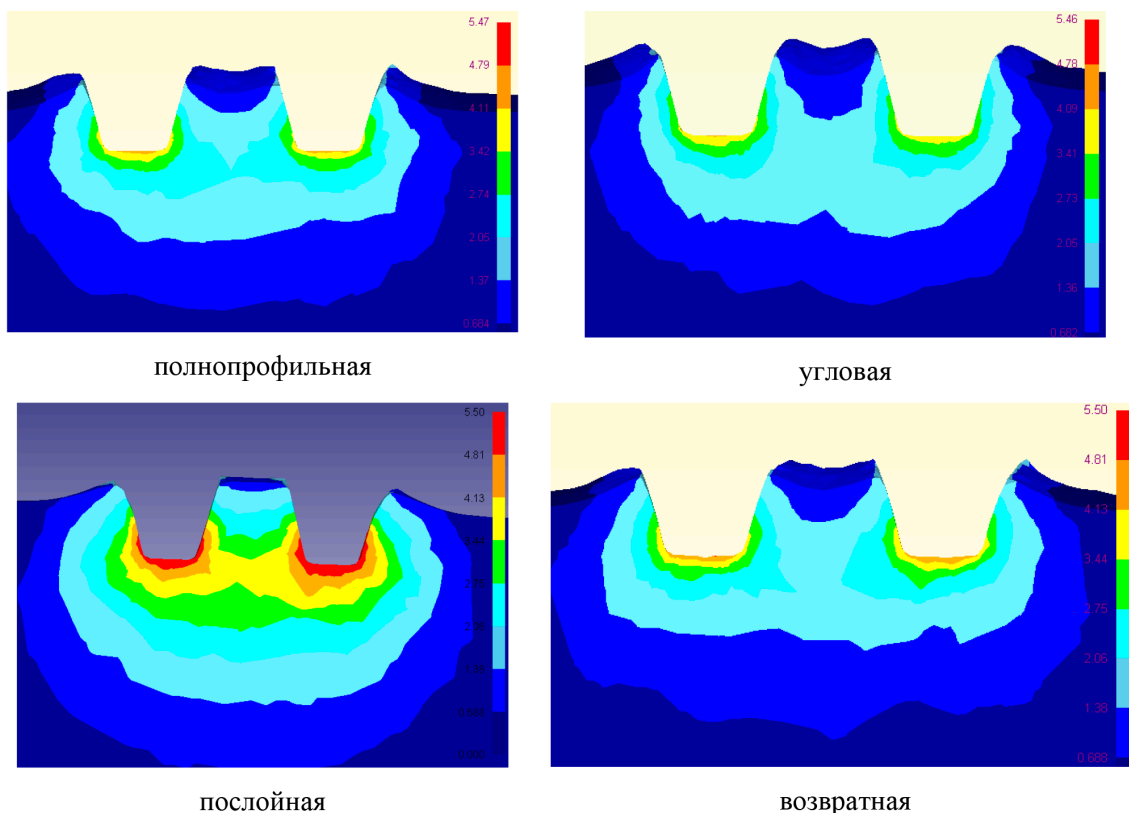


Рис. 2. Поля эквивалентных деформаций при РДО резьбы Tr40x6 с разными схемами деформирования

Сравнение распределения полей деформаций для разных схем деформирования, приведенных на рис. 2, позволяет сделать вывод о том, что при послойной схеме деформирования под притупленной вершиной витка накатного инструмента образуются застойные зоны, препятствующие свободному течению металла. В связи с этим резко возрастают силы деформирования и степень накопленного повреждения материала (при послойной схеме деформирования величина критерия разрушения в 2...4 раза выше, чем при полнопрофильной). При возвратной схеме деформирования деформации и накопленные повреждения материала минимальны, так как условия течения материала благоприятны.

Полученные эквивалентные деформации говорят о том, что послойной схемой деформирования обеспечивается наибольшее упрочнение витков резьбы заготовки при РДО. Однако, при применении данной схемы для РДО крупных трапецидальных резьб возникают значительные силы и существует опасность разрушения заготовки. В связи с этим использование угловой схемы деформирования является более рациональным для повышения степени

упрочнения витков резьбы с трапецидальным профилем.

Уменьшение силы деформирования можно получить с помощью возвратной схемы РДО. Следствием этого будет являться снижение напряжений в рабочих витках резьбонакатного инструмента. В то же время, при этой схеме имеет место минимальная степень деформации и, следовательно, наименьшее упрочнение витков накатываемой резьбы.

На основании оценки полученных при вычислительном эксперименте эквивалентных деформаций и критерия разрушения, а также анализа известных экспериментальных данных [1, 2], можно определить примерные области использования схем деформирования при РДО резьб с трапецидальным профилем, представленные на рис. 3 в координатах достигаемой максимальной степени упрочнения материала заготовки и шага обрабатываемой резьбы.

Из приведенных на рис. 3 диаграмм следует, что возвратная схема деформирования наиболее предпочтительна для получения резьб трапецидальной формы с наиболее крупным шагом.

Применение технологий, не попадающих в области рационального использова-

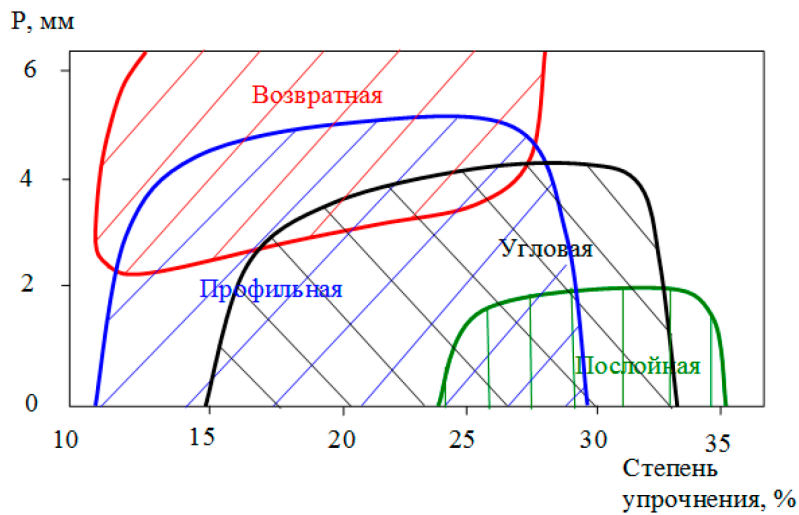
ния, приведет к существенным проблемам. Если они будут ближе к нулевой точке диаграммы, это вызовет снижение качества резьбы при росте себестоимости ее изготовления. Если будут дальше от нулевой точки диаграммы, то это будет приводить к повышенному износу инструмента и опасности разрушения заготовки. В случае выхода параметров резьбы за пределы областей рационального применения накатывания и РДО возможно только поверхностное упрочнение нарезанной резьбы обкатыванием без существенного изменения размеров винтовой канавки.

При повышении твердости материала заготовки рекомендуемые области использования схем деформирования при РДО резьб с трапецидальным профилем будут

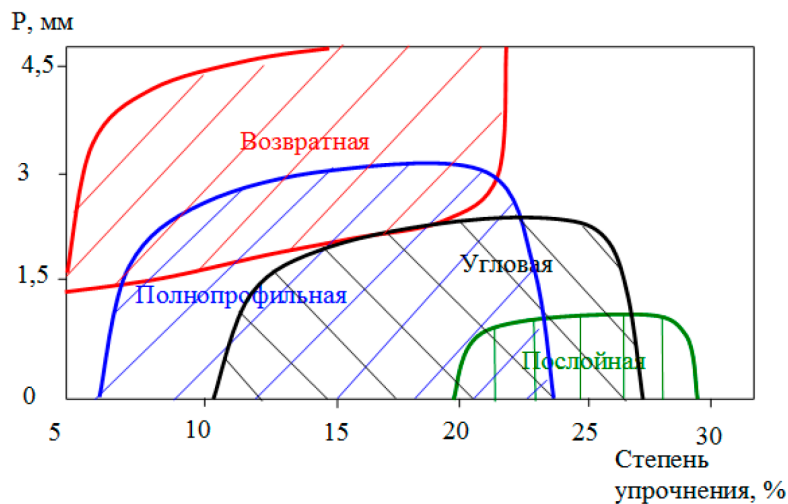
уменьшаться как по оси абсцисс, так и по оси ординат (рис 3б).

Полученные для стали 40Х результаты могут быть распространены и на другие виды материалов. Для более твердых и менее пластичных сталей рекомендуемые области использования схем деформирования будут сжиматься по направлению к нулевой точке графика, а для более пластичных наоборот, расширяться.

Для определения припуска под накатывание при РДО трапецидальных резьб с полнопрофильной схемой деформирования на заготовках из сталей в состоянии поставки получены графики потребной глубины предварительно нарезанной винтовой канавки в зависимости от шага накатываемой резьбы (рис. 4).



а



б

Рис. 3. Рекомендуемые области использования схем деформирования при РДО резьб с трапецидальным профилем на заготовках из стали 40Х в состоянии поставки (а) и упрочненной до HRC 30 (б)

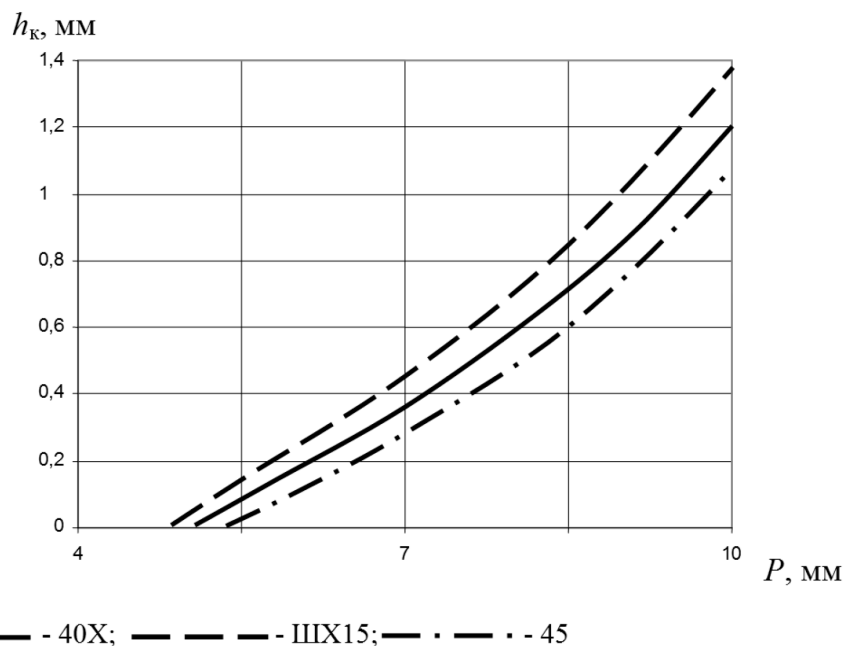


Рис. 4. Требуемая глубина предварительно нарезанной винтовой канавки при РДО с полнопрофильной схемой деформирования резьб с трапецеидальным профилем на заготовках из различных сталей в состоянии поставки

При формировании резьб на заготовках, упрочненных термической обработкой, величину канавки необходимо увеличивать в соответствии с ростом твердости материала заготовки, уменьшая припуск под накатывание. Для угловой схемы рекомендуемая глубина канавки будет больше на 25%, а для возвратной меньше на 30%.

Угол профиля предварительно прорезанной канавки при РДО в определяющей степени будет зависеть от механических свойств материала заготовки. Для более прочных и менее пластичных материалов данный угол профиля должен уменьшаться. Для более мягких и пластичных – увеличиваться. Однако, если угол прорезанной винтовой канавки будет меньше, чем угол профиля накатываемой резьбы, возникнет возвратная схема деформирования. Следовательно, для обеспечения угловой схемы угол профиля предварительно нарезанной канавки должен быть больше угла профиля получаемой резьбы.

### Заключение

Соблюдение приведенных выше рекомендаций по выбору схем деформирования и распределению припуска между нарезанием и накатыванием позволит существенно расширить область применения РДО для получения крупных трапецеидальных резьб. Это, в свою очередь, обеспечит повышение прочностных характеристик тяже-

лонагруженных резьбовых деталей, в особенности усталостной прочности, при одновременном снижении себестоимости изготовления по сравнению с применяемыми на сегодняшний день технологиями.

### Список литературы

1. Jianli Song, Zhiqi Liu, Yongtang Li. Cold Rolling Precision Forming of Shaft Parts. Springer. 2017. 288 p.
2. Киричек А.В., Афонин А.Н. Резьбонакатывание. Библиотека технолога. М.: Машиностроение, 2009. 312 с.
3. Григорьева А.В., Туранский Р.А., Шакиров Р.К., Песин М.В. Повышение усталостной прочности резьбы деталей машиностроения // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика. 2014. Т. 2. С. 437-443.
4. Таурит Г.Э., Пуховский Е.С., Добрянский С.С. Прогрессивные процессы резьбоформирования. Киев: Техніка, 1975. 240 с.
5. Афонин А.Н. Схемы деформирования при режущо-деформирующей обработке резьб // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2012. № 2/292. С. 3-8.
6. Fu M.W. Design and Development of Metal-Forming Processes and Products Aided by Finite Element Simulation. Springer International Publishing AG. 2017. 258 p.
7. Krzysztof Kukielka. Application of the FEM Method to Modeling and Analysis of the Cold Thread Rolling Process // Modeling and Experimental Analysis of Metal Forming and Cutting. 2023. Vol. 16 (13). P. 4647.
8. Владимиров А.А., Афонин А.Н., Макаров А.В. Особенности механизма формирования микронеровности поверхности при вибрационном точении // Научно-технический вестник Поволжья. 2019. № 2. С. 27-29.
9. Skripalenko M.M., Romantsev B.A., Galkin S.P., Skripalenko M.N., Danilin A.V. Comparative analysis of damage criteria for screw rolling using computer simulation // CIS Iron and Steel Review. 2020. Vol. 20. P. 29-32.