

Received: 30.01.2026

Revised: 24.04.2026

Accepted: 05.06.2026

DOI: 10.17804/2410-9908.2026.3.078-088

NUMERICAL STUDY OF THE STRESS-STRAIN STATE OF STRUCTURAL STEEL WORKPIECES UNDER HIGH-TEMPERATURE THERMOMECHANICAL TREATMENT BY HELICAL ROLLING

V. B. Dementyev^{a,*}, Yu. V. Ganziy^b, and K. G. Volkov^c

Udmurt Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
34 T. Baramzinoy St., Izhevsk, 426067, Russia

^a  <https://orcid.org/0009-0008-9367-7606>  demen@udman.ru;

^b  <https://orcid.org/0009-0000-5642-8899>  ganziy@udman.ru;

^c  <https://orcid.org/0000-0003-0606-5481>  vkirill@udman.ru

*Corresponding author. Email: demen@udman.ru

Address for correspondence: ul. T. Baramzinoy, 34, Izhevsk, 426067, Russia

Tel.: (3412) 50-8200; fax: (3412) 50-7959

The paper presents a numerical study of the stress-strain state of structural steel workpieces subjected to high-temperature thermomechanical treatment by helical rolling. This technology ensures obtaining the specified dimensions, shape, and surface quality of products and simultaneously improves significantly their physical and mechanical characteristics, this being especially important for parts operated under severe conditions. The problem statement and the procedure of simulating the deformation process using the DEFORM-3D software package are discussed in detail. The paper studies various loading patterns, the effect of the rotation angle of the deforming rollers, the reduction ratio, and other process parameters on the formation of stress and strain fields in the workpiece. Emphasis is laid on analyzing the distribution of axial, radial, and tangential stresses, as well as on identifying radial-shear strains. The simulation results show that varying the ratio of the process parameters, one can control the material structure and properties, create hardened surface layers, and minimize loads on the tool. It has been found that the application of high-temperature thermomechanical treatment by helical rolling increases the ultimate strength, ductility, and durability of products compared to conventional heat treatment. The significance of mathematical modeling for optimizing process conditions, reducing the number of full-scale experiments, and accelerating the introduction of innovative metal forming methods into mass production is emphasized.

Keywords: helical rolling technology, high-temperature thermomechanical treatment (HTMT), deformation of steel workpieces

References

1. Khvan, D.V. and Voropaev, A.A. Strengthening of shafts by plastic deformation. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie Nauki*, 2019, 5, 191–196. (In Russian).
2. Nikishkina, A.B. and Bulychev, V.V. Simulation of the depth of hardening of parts made of gray cast iron during processing by surface plastic deformation. *Inzhenernyi Vestnik Dona*, 2022, 11. (In Russian). Available at: <https://www.ivdon.ru/en/magazine/archive/n11y2022/7980>
3. Lavrentyev, A.Yu., Barchukov, D.A., and Romanenko, D.N. Reinforcement of surfaced high-speed steel by plastic deformation and heat treatment. *Izv. Yugo-Zapad. Gos. Univers.*, 2013, 1 (46), 94–100. (In Russian).

4. Mamontov, D.V., Sklizkov, I.D., Asylbaev, A.V., and Vafin, R.K. Influence of severe plastic deformation on the hardened layer characteristics of high-speed tool steel HSS M2. *Materials. Technologies. Design*, 2022, 4, 1 (7), 30–38. (In Russian). DOI: 10.54708/26587572_2022_41730.
5. Ochilov, E., Egamberdiev, I., Saibov, M., and Khamroev, N. Effect of heat treatment on the physical and mechanical properties of 45KhN2MFA steel. *Journal of Advances in Engineering Technology*, 2025, 2 (18), 98–105. (In Russian). DOI: 10.24412/2181-1431-2025-2-98-105.
6. Dyachkova, L.N., Vytiaz, P.A., and Zverko, A.A. Features of structure formation in antifriction composite powder infiltrated with copper alloy material based on iron (pseudo-alloy) under high-temperature thermomechanical treatment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*, 2023, 68 (3), 196–207. (In Russian). DOI: 10.29235/1561-8358-2023-68-3-196-207.
7. Sága, M., Dementyev, V.B., Korshunov, A.I., Vaško, M., Koretskii, V.P., and Bozek, P. The concept of a mechanism for the formation of bimetallic structures. *MM Science Journal*, 2025, 2025 (4), 8722–8726.
8. Rogovoy, A.A. and Salikhova, N.K. Numerical simulation of the nickel alloy microstructure formed in the process of hot fogging. *Vestnik PNIPU. Mekhanika*, 2022, 3, 135–146. DOI: 10.15593/perm.mech/2022.3.14.
9. Dementyev, V.B., Sagova, Z., Korshunov, A., Saga, M., and Koretskiy, V.P. Contribution to improving of machine parts mechanical properties by thermomechanical hardening. *MM Science Journal*, 2024, 2024 (5), 7800–7804. DOI: 10.17973/mmsj.2024_11_2024058.
10. Lipanov, A.M., Dementiev, V.B., and Zasytkin, A.D. To the question of the application of hollow fingers in tracks military tracked vehicles. *Izvestiya Rossiyskoy Akademii Raketnykh i Artileriysskikh Nauk*, 2022, 4 (124), 86–91. (In Russian).

Подана в журнал: 30.01.2026

УДК 621.78

DOI: 10.17804/2410-9908.2026.3.078-088

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗАГОТОВОК ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ВИНТОВЫМ ОБЖАТИЕМ

В. Б. Дементьев^{а, *}, Ю. В. Ганзий^б, К. Г. Волков^в

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук»,
ул. Т. Барамзиной, д. 34, г. Ижевск, 426067, Россия*

^а  <https://orcid.org/0009-0008-9367-7606>  demen@udman.ru;

^б  <https://orcid.org/0009-0000-5642-8899>  ganziy@udman.ru;

^в  <https://orcid.org/0000-0003-0606-5481>  vkirill@udman.ru

*Ответственный автор. Электронная почта: demen@udman.ru

Адрес для переписки: ул. Т. Барамзиной, д. 34, г. Ижевск, 426067, Россия

Тел.: +7 (3412) 50-82-00; факс: (3412) 50-79-59

В статье представлено численное исследование напряженно-деформированного состояния заготовок из конструкционных сталей, подвергаемых высокотемпературной термомеханической обработке методом винтового обжата. Рассматриваемая технология позволяет одновременно обеспечивать заданные размеры, форму и качество поверхности изделий, а также существенно улучшать их физико-механические характеристики, что особенно важно для деталей, эксплуатируемых в тяжелых условиях. Подробно описана постановка задачи и методика моделирования процесса деформации с помощью программного комплекса DEFORM-3D. В работе исследованы различные схемы нагружения, влияние угла разворота деформирующих роликов, степени обжата и других технологических параметров на формирование полей напряжений и деформаций в заготовке. Особое внимание уделено анализу распределения осевых, радиальных и тангенциальных напряжений, а также выявлению радиально-сдвиговых деформаций. Результаты моделирования показали, что варьирование соотношения технологических параметров позволяет управлять структурой и свойствами материала, создавать упрочненные поверхностные слои и минимизировать нагрузки на инструмент. Установлено, что применение высокотемпературной термомеханической обработки винтовым обжатием способствует повышению предела прочности, пластичности и долговечности изделий по сравнению с традиционной термической обработкой. В заключении подчеркивается значимость математического моделирования для оптимизации технологических режимов, сокращения числа натурных экспериментов и ускорения внедрения инновационных методов обработки металлов давлением в серийное производство.

Ключевые слова: технология винтового обжата, высокотемпературная термомеханическая обработка (ВТМО), деформация стальных заготовок

1. Введение

Технологические операции пластического деформирования зачастую используются для обеспечения не только требуемых форм и размеров металлических заготовок, но и для повышения механических характеристик материалов. Большинство методов пластического деформирования конструкционных сталей могут обеспечивать повышение прочностных и пластических характеристик, составляющее вплоть до 50 % от исходного состояния. Однако при этом возни-

кает анизотропия свойств материала, что в некоторых случаях приводит к снижению условного предела текучести в поперечном направлении [1]. Но, несмотря на это, процессы пластического деформирования широко применяются для обработки материалов с целью придания определенного комплекса свойств. Данное направление технологической обработки материалов может использоваться для поверхностного упрочнения чугунов и конструкционных сталей, повышения эксплуатационной стойкости режущего инструмента и т. д. [2–4].

Среди различных вариантов обработки пластическим деформированием немалый интерес вызывают способы высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО). Как описано в работах [5, 6], ВТМО позволяет одновременно повысить прочностные и пластические характеристики материалов, ударную вязкость за счет обеспечения соответствующей мелкозернистой микроструктуры стали. При этом среди данных методов одним из высокоэффективных является процесс винтового обжатия (ВО) [7]. Процесс высокотемпературной термомеханической обработки методом винтового обжатия является технологией формообразования деталей машиностроительных конструкций. Применение данного метода позволяет достичь высоких механических свойств изделий благодаря комплексному воздействию температурных и деформационных факторов на структуру материала. Метод обеспечивает получение заданных размеров, формы и качества поверхностей заготовки одновременно с улучшением физико-механических характеристик. Он может применяться для изготовления деталей из конструкционных сталей, используемых в металлургической и машиностроительной отраслях, где предъявляются повышенные требования к прочности, износостойкости и долговечности изделий.

При ВТМО ВО происходит одновременное воздействие температуры и интенсивной пластической деформации, вследствие чего формируется сложная многоуровневая структура материала. Контроль распределения деформаций и напряжений дает возможность установить оптимальный режим обработки, минимизируя риск разрушения заготовок и увеличивая долговечность готовых деталей.

Возможность исследовать влияние различных факторов на структуру и свойства материала еще до начала физического эксперимента является актуальной задачей. Использование современных численных методов и компьютерных программ дает возможность проводить исследование множества вариантов режимов обработки, изменяя в достаточно широком диапазоне температуру, скорость подачи, степень обжатия, угол разворота деформирующих роликов, скорость охлаждения и другие параметры процесса. Это позволяет выбрать оптимальный вариант технологических режимов обработки. Математическое моделирование позволяет определять поля напряжений и деформаций непосредственно в ходе процесса, а также выявлять зоны концентрации напряжений и потенциально опасные участки заготовки без осуществления натурных испытаний, которые связаны с большими материальными затратами и длительным временем проведения эксперимента [8].

На основании вышесказанного целью работы является исследование напряженно-деформированного состояния материала при ВТМО ВО с использованием программного комплекса DEFORM-3D для определения технологических параметров процесса.

2. Постановка задачи

Рассмотрим процесс деформации заготовки из конструкционных сталей (38ХС, 30ХГСА, 60С2А и др.) при винтовом обжатии с ВТМО, который заключается в принудительной подаче горячей заготовки через неприводные деформирующие ролики, развернутые под углом к оси заготовки. При этом осуществляются три схемы деформации: с осевым растяжением, с минимальной осевой составляющей и со сжатием в очаге деформации. Основное движение заготовки осуществляется приводом с постоянной подачей. Данные схемы изменяют напряженно-деформированное состояние в очаге деформации. Причем кроме основной радиальной составляющей присутствуют схема разнонаправленного деформирования кручением и закалка изделия в напряженном состоянии. Схема представлена на рис. 1.

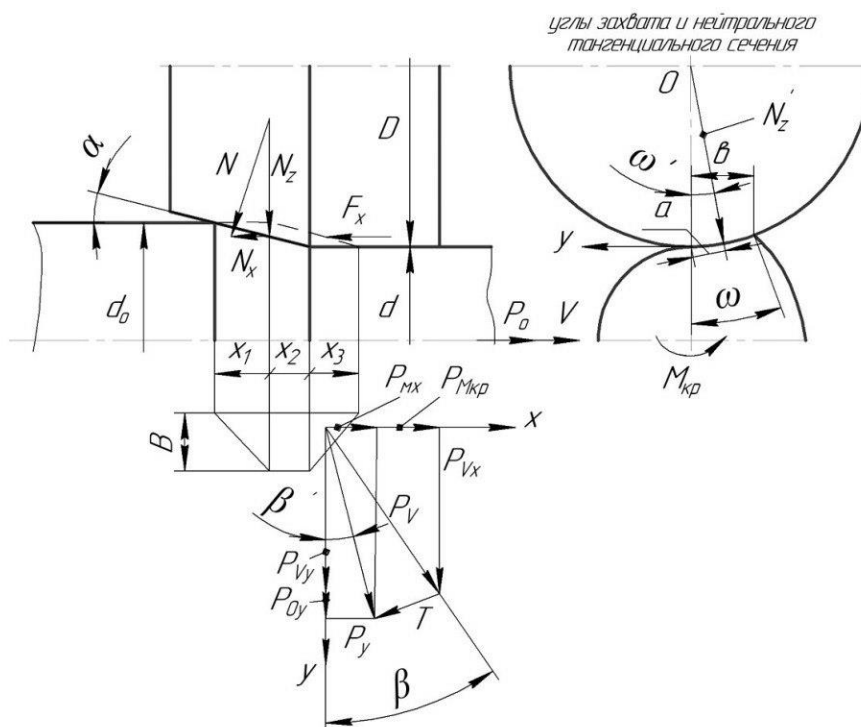


Рис. 1. Расчетная схема процесса винтового обжатия стальной осесимметричной заготовки при ВТМО

Для моделирования процесса была выбрана сталь 30ХГСА в виде проката круглого сечения с диаметром 30 мм. Заготовка была определена как пластичное тело, а деформирующие ролики – как абсолютно твердое тело. При подготовке модели была сформирована конечно-элементная расчетная сетка, состоящая из 100 тысяч элементов в форме тетраэдра с длиной грани в пределах 1,2 мм. Обеспечено равномерное распределение элементов по сечению заготовки. Шаг расчета принят равным 0,5 мм. Остановка расчета задана при перемещении заготовки на 200 мм. Для заготовки разрешено вращение вокруг продольной оси и поступательное движение. Для роликов разрешено вращение вокруг собственной оси. В контакте роликов и заготовки задан параметр сухого трения с коэффициентом 0,7.

3. Результаты и обсуждение

Технологические параметры исследуемого режима приведены в таблице.

Для расчета в программном комплексе DEFORM-3D были приняты следующие параметры: $d = 27,2$ мм; $D = 112,5$ мм; $\alpha = 15,50^\circ$; $\beta' = 3,30^\circ$; $\beta = 3,30^\circ$; $n = 200$ об/мин; $t = 1000$ °С; $\mu = \frac{d_0^2}{d^2} = 1,19$; $\varepsilon = 20$ %.

Основными технологическими параметрами являются угол разворота деформирующих роликов β , степень обжатия ε и угол конуса роликов во входной части очага деформации α , варьирование которых позволяет изменять структуру и свойства, качество поверхности и точность изделия. Степень обжатия ε определяется как

$$\varepsilon = \ln \left(\frac{F_0}{F} \right) \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где F_0 – площадь поперечного сечения заготовки до деформации, мм²; F – площадь поперечного сечения заготовки после деформации, мм².

Таблица

Технологические параметры исследуемого режима

Диаметр заготовки до деформации, мм	d_0	Угол меридионального сечения заготовки, град.	ω'
Диаметр заготовки после деформации, мм	d	Вектор трения на калибрующем участке, Н	T
Зоны деформации: – входящая, мм – средняя, мм – выходящая, мм	x_1 x_2 x_3	Величина вытяжки	μ
Результирующее радиальное усилие, Н	P_v	Диаметр деформирующих роликов по калибрующему участку, мм	D
Сила, нормальная к очагу деформации, Н: – проекция нормальной силы на ось z , Н – проекция нормальной силы на ось x , Н	N N_z N_x	Угол конуса деформирующего ролика, град.	α
Ширина контакта очага деформации заготовки, мм	B	Угол разворота деформирующих роликов, град.	β'
Ширина дуги касания, мм	a	Угол подачи заготовки, град.	β
Длина дуги касания, мм	b	Частота вращения заготовки, об/мин	n
Осевое усилие в заготовке, Н	P_o	Температура нагрева заготовки, °C	t
Угол дуги касания, град.	ω	Степень обжатия	ε

Для анализа влияния параметров процесса на напряженно-деформированное состояние в качестве критерия было выбрано отношение угла разворота β к углу подачи изделия β' .

Угол подачи изделия определяется по формуле

$$\beta' = \text{arctg } S/\pi d, \quad (2)$$

где S – подача изделия в установке винтового обжатия, мм/об; d – диаметр заготовки, мм.

В программном комплексе DEFORM-3D было проведено моделирование методом конечных элементов процесса винтового обжатия заготовки сплошного сечения при различных значениях угла подачи изделия β' . Отношение β/β' изменялось в диапазоне от 0,47 до 1,65.

В результате было установлено, что вдоль всего очага деформации на глубину до половины радиуса заготовки происходит всестороннее сжатие (рис. 2). На участке от середины радиуса возникают растягивающие тангенциальные напряжения, стремящиеся к нулю в центре заготовки. Характер осевых напряжений в центре заготовки напрямую зависит от соотношения β/β' .

На глубине до 40 % от радиуса радиальные деформации отрицательны, осевые деформации направлены в сторону движения заготовки, тангенциальные – противоположно вращению заготовки. Ближе к центру деформации стремятся к нулю, однако направление осевых деформаций (аналогично напряжениям) зависит от угла подачи изделия. При $\beta = \beta'$ напряжения и деформации в центре заготовки практически отсутствуют (рис. 3).

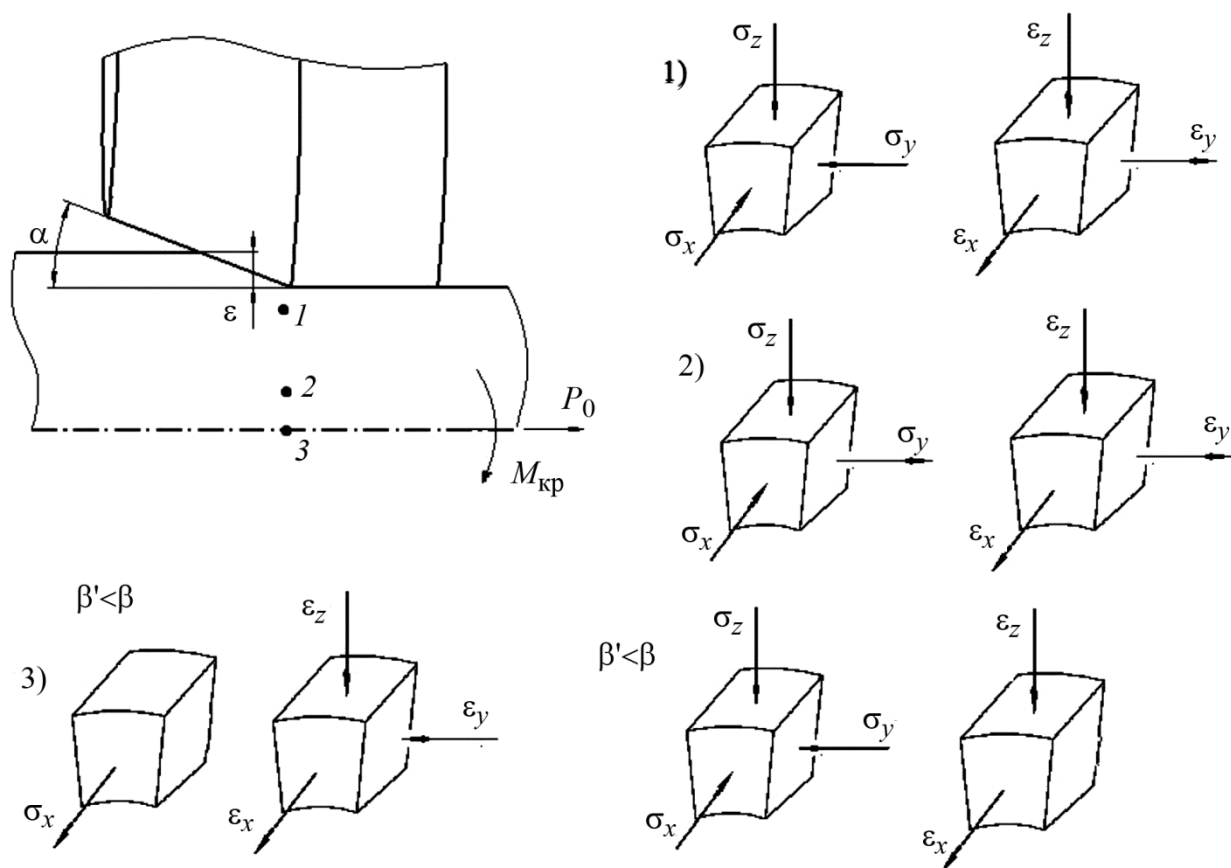


Рис. 2. Схема напряженно-деформированного состояния при винтовом обжатии (в продольном сечении)

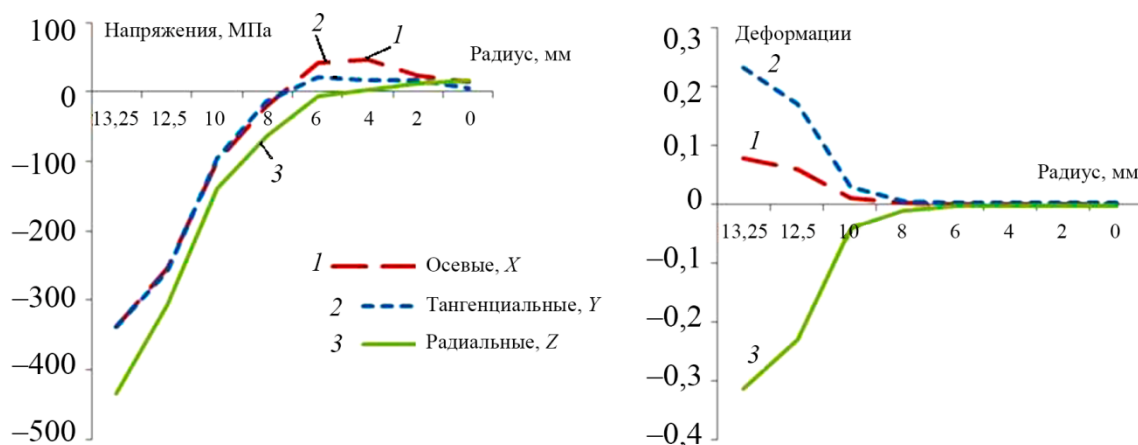


Рис. 3. Напряжения и деформации при $\beta = \beta'$

При рассмотрении очага деформации в поперечном сечении было выявлено, что осевые и тангенциальные напряжения по мере вращения заготовки стремятся к нулю, а радиальные – от сжимающих напряжений к растягивающим. Деформации во всех направлениях по мере вращения заготовки меняют знак (рис. 4).

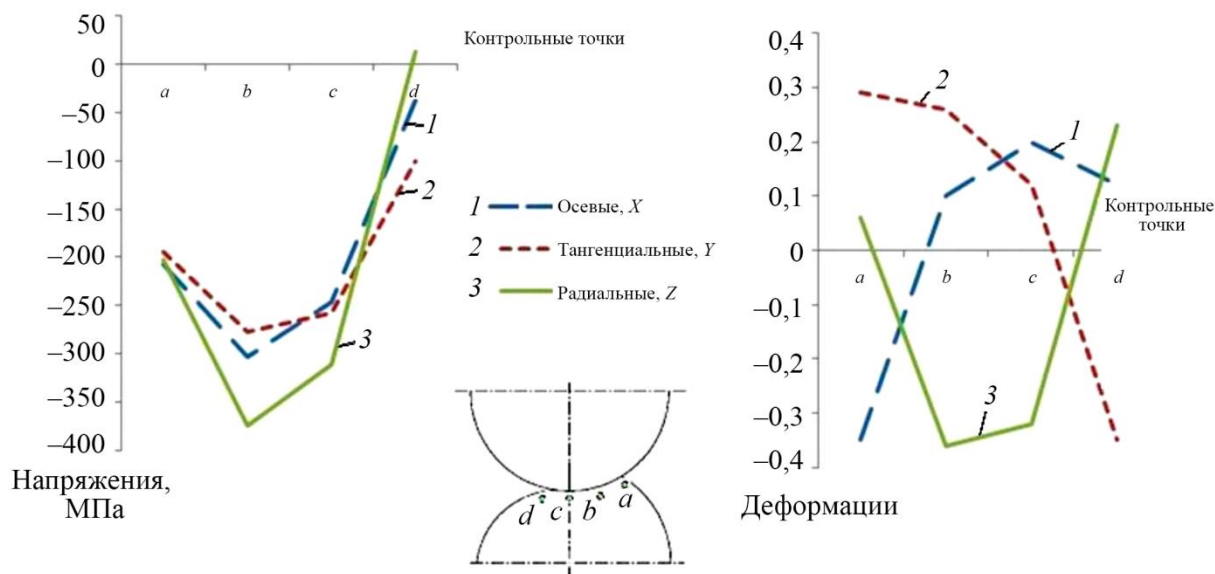


Рис. 4. Напряжения и деформации при винтовом обжати (в поперечном сечении)

Также следует отметить сдвиговые деформации, оказывающие влияние на возникновение анизотропии свойств изделия. При моделировании процесса в программном комплексе определено, что радиально-сдвиговые деформации $\varepsilon_{сд\ z}$ распространяются на глубину, большую, чем половина радиуса заготовки r (рис. 5).

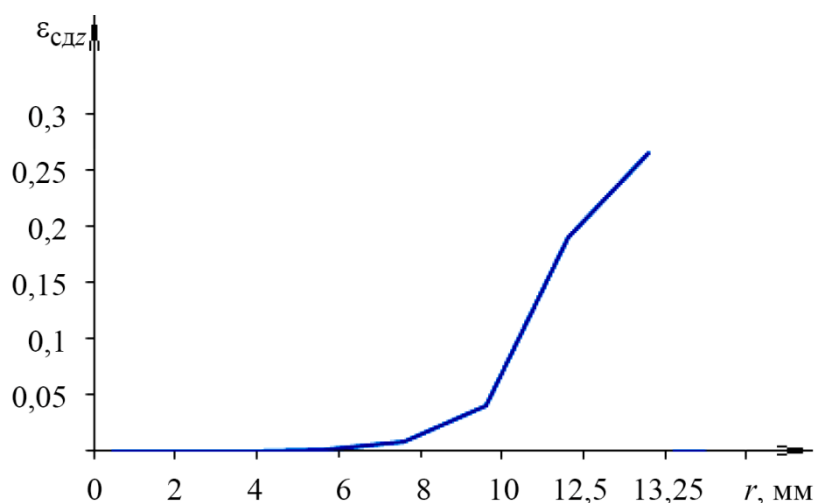


Рис. 5. Распределение сдвиговых деформаций $\varepsilon_{сд\ z}$ по радиусу заготовки r

Как уже было сказано ранее, изменение скорости (а следовательно, и угла подачи изделия) влияет на напряженно-деформированное состояние центральной части заготовки. На рис. 6 изображено распределение напряжений и деформаций по сечению заготовки при $\beta' < \beta$. В этом случае ближе к оси симметрии заготовки возникают растягивающие осевые напряжения и деформации. Осевые напряжения меняют направление на глубине половины радиуса изделия.

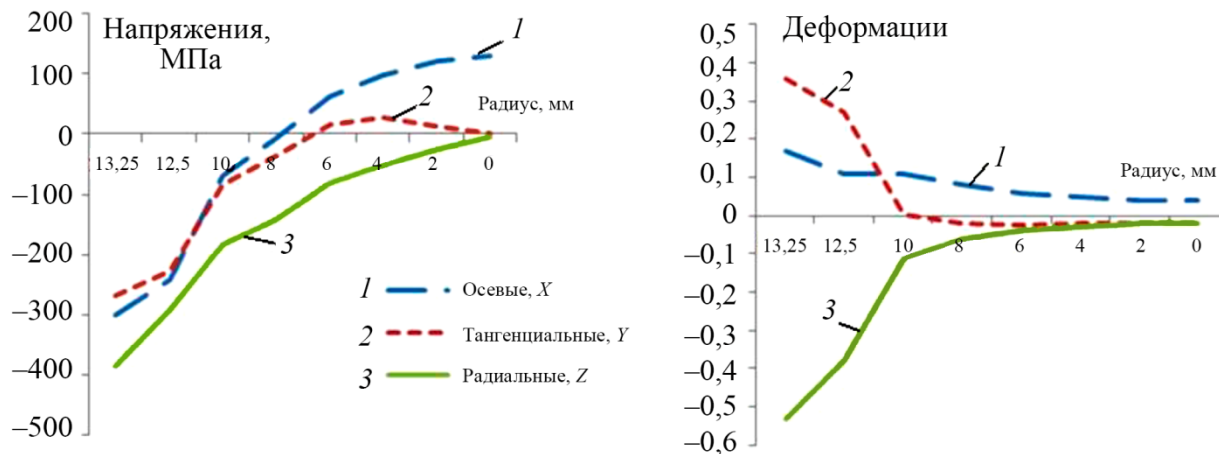


Рис. 6. Напряжения и деформации при $\beta' < \beta$

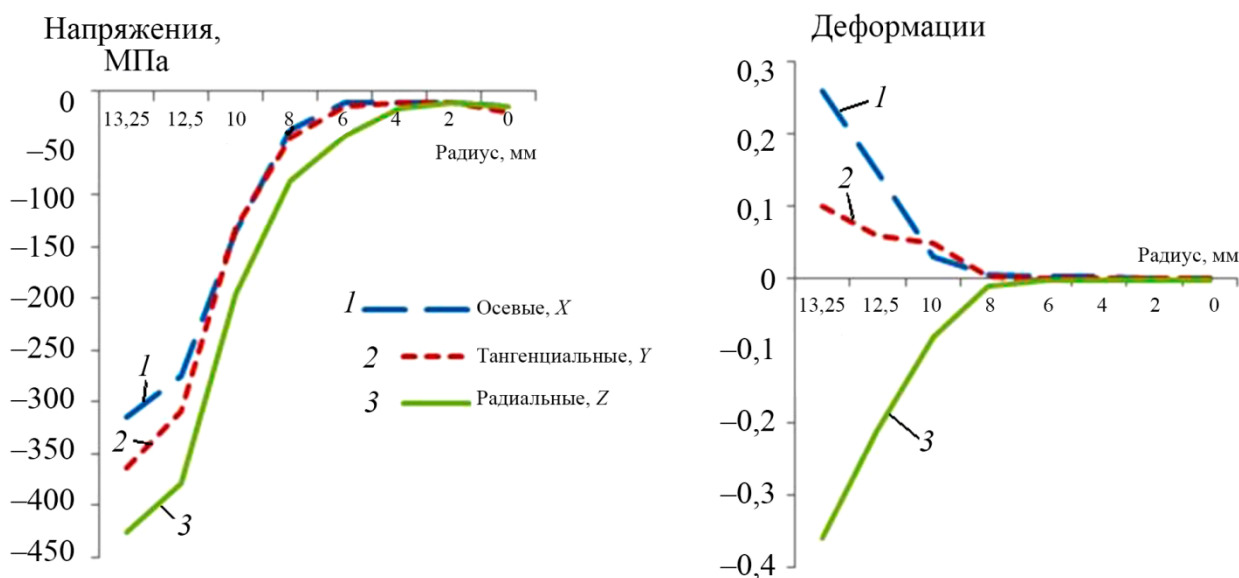


Рис. 7. Напряжения и деформации при $\beta' > \beta$

При $\beta' > \beta$ напряжения во всех направлениях являются сжимающими и знак по сечению не меняют. Деформации проникают на глубину не более половины радиуса заготовки (рис. 7).

В результате моделирования была получена аппроксимационная зависимость осевых деформаций в центральной части заготовки от соотношения угла подачи изделия и угла разворота деформирующих роликов:

$$\varepsilon_x = \frac{0,0048\beta^2}{\beta'} - \frac{0,038\beta}{\beta'} + 0,0713. \quad (3)$$

Изменение осевых и радиальных усилий на изделии в зависимости от угла подачи представлено на рис. 8. При соотношении β/β' , близком к единице, значительно снижается нагрузка на инструмент.

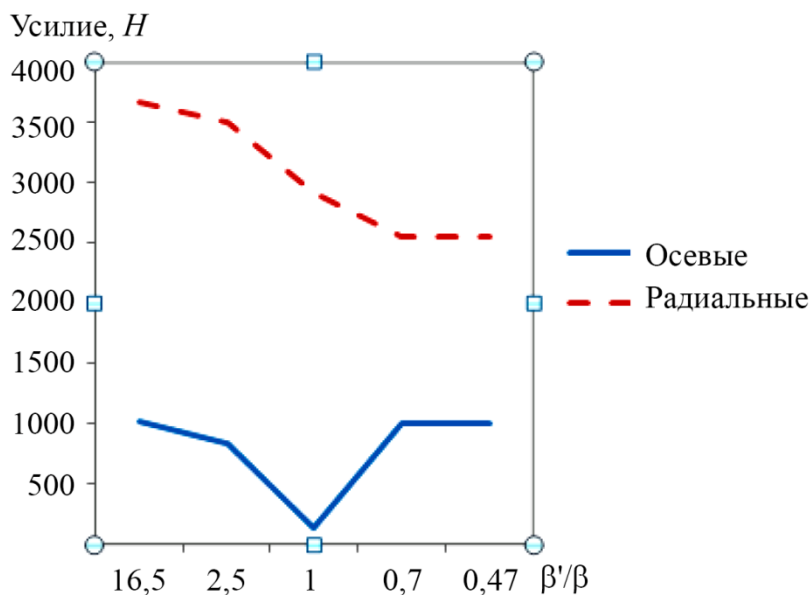


Рис. 8. Усилия при различном соотношении β/β'

Обработка результатов моделирования позволила установить напряженно-деформированное состояние при ВТМО винтовым обжатием заготовки сплошного сечения, характер изменения деформаций и усилий на инструмент при различных углах подачи изделия. Варьируя соотношение β/β' , можно получать детали с поверхностно упрочненным слоем за счет создания сжимающих напряжений в поверхностных слоях и растягивающих в середине заготовки. Оптимальный выбор технологических параметров ВТМО винтовым обжатием позволяет формировать повышенный комплекс свойств конструкционных сталей. Так, например, наблюдается повышение на 8...10 % предела прочности σ_B , на 7...9 % условного предела текучести $\sigma_{0,2}$, на 10...15 % относительного удлинения δ и до двух раз долговечности для отдельных видов изделий по сравнению с образцами, изготовленными с применением объемной закалки в печах [9, 10].

4. Заключение

Оценка напряженно-деформированного состояния необходима для обоснования выбора исходных материалов и конструктивных решений при проектировании изделий, подлежащих дальнейшей ВТМО винтовым обжатием. Грамотный учет влияния технологических факторов на механические свойства позволяет создать эффективные рекомендации по применению метода в серийном производстве сложных изделий с высокими эксплуатационными характеристиками. Использование математического моделирования перед проведением реальных опытов улучшает контроль качества производимых изделий, ускоряет разработку новых технологических процессов и способствует значительному уменьшению количества экспериментальных исследований, необходимых для внедрения инновационных методов обработки металлов давлением.

В рамках модернизации производства изделий высокой точности и с повышенными эксплуатационными характеристиками все большее применение находит процесс ВТМО винтовым обжатием, при котором осевое усилие и крутящий момент передаются заготовке, а она, в свою очередь, деформируется в трех неприводных валках, развернутых относительно плоскости деформации на угол β .

Для оптимизации деформационной схемы и широкого промышленного внедрения указанного процесса ведутся исследования напряженно-деформированного состояния.

Литература

1. Хван Д. В., Воропаев А. А. Упрочнение валов пластическим деформированием // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2019. – № 5. – С. 191–196.
2. Никишкина А. Б., Булычев В. В. Моделирование глубины упрочнения деталей из серого чугуна при обработке поверхностным пластическим деформированием // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 11. – URL: <https://www.ivdon.ru/en/magazine/archive/n11y2022/7980>
3. Лаврентьев А. Ю., Барчуков Д. А., Романенко Д. Н. Упрочнение наплавленной быстрорежущей стали пластическим деформированием и термической обработкой // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2013. – № 1 (46). – С. 94–100.
4. Влияние интенсивной пластической деформации на характеристики упрочненного слоя инструментальной быстрорежущей стали Р6М5 / Д. В. Мамонтов, И. Д. Склизов, А. В. Асылбаев, Р. К. Вафин // Materials. Technologies. Design. – 2022. – Т. 4, № 1 (7). – С. 30–38. – DOI: 10.54708/26587572_2022_41730.
5. Влияние термической обработки на физико-механические свойства стали 45ХН2МФА / Э. Очилов, И. Эгамбердиев, М. Саибов, Н. Хамроев // Journal of Advances in Engineering Technology. – 2025. – Vol. 2 (18). – С. 98–105. – DOI: 10.24412/2181-1431-2025-2-98-105.
6. Дьячкова Л. Н., Витязь П. А., Зверко А. А. Особенности структурообразования в антифрикционном композиционном порошковом инфильтрированном медным сплавом материале на основе железа (псевдосплаве) при высокотемпературной термомеханической обработке // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2023. – Т. 68 (3). – С. 196–207. – DOI: 10.29235/1561-8358-2023-68-3-196-207.
7. The concept of a mechanism for the formation of bimetallic structures / M. Sága, V. B. Dementyev, A. I. Korshunov, M. Vaško, V. P. Koretskii, P. Bozek // MM Science Journal. – 2025. – Vol. 2025 (4). – P. 7738–7745.
8. Роговой А. А., Салихова Н. К. Численное моделирование технологического процесса горячей обработки слитка давлением // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2022. – № 3. – С. 135–146. – DOI: 10.15593/perm.mech/2022.3.14.
9. Contribution to improving of machine parts mechanical properties by thermomechanical hardening / V. B. Dementyev, Z. Sagova, A. Korshunov, M. Sága, V. P. Koretskiy // MM Science Journal. – 2024. – Vol. 2024 (5). – P. 7800–7804. – DOI: 10.17973/mmsj.2024_11_2024058.
10. Липанов А. М., Дементьев В. Б., Засыпкин А. Д. К вопросу применения полых пальцев в траках военно-гусеничных машин // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. – 2022. – № 4 (124). – С. 86–91.