

УДК 621.787.4

С. А. Зайдес, д-р техн. наук, проф., **Т. Т. Ле**, аспирант.Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск,
РоссияТел./Факс: +7 9501235382; E-mail: lechung275@gmail.com

ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ УПРОЧНЁННЫХ ВОЛОКОН НА НАПРЯЖЁННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИ КРУЧЕНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ

В статье исследуется влияние пространственной ориентации упрочнённых волокон, формируемых в результате поверхностного пластического деформирования, на напряжённое состояние цилиндрических образцов при кручении. Проведено численное моделирование в ANSYS для трёх углов наклона волокон: 0° , 45° и 90° . Установлено, что наклон под углом 45° обеспечивает наибольшую равномерность распределения касательных напряжений и максимальную прочность. При ориентации волокон вдоль оси (0°) наблюдается меньшая устойчивость, а при поперечном расположении (90°) — наименьшая. Результаты указывают на необходимость рационального выбора направления упрочнённой текстуры в зависимости от условий эксплуатации деталей.

Ключевые слова: упрочнённые волокна, напряжённое состояние, ANSYS, кручение, касательные напряжения, поверхностное упрочнение.

S.A. Zaides, T.C. Le

INFLUENCE OF STRENGTHENING FIBER ORIENTATION ON THE STRESS STATE DURING TORSION OF CYLINDRICAL SPECIMENS

This paper investigates the influence of the spatial orientation of strengthening fibers, formed by surface plastic deformation (SPD), on the stress state of cylindrical specimens under torsion. Numerical simulations were conducted in ANSYS for three fiber orientation angles: 0° , 45° , and 90° . It was found that a 45° inclination provides the most uniform distribution of shear stresses and the highest torsional strength. Fibers aligned along the axis (0°) exhibit lower resistance, while transverse orientation (90°) results in the weakest performance. The findings highlight the importance of selecting an optimal fiber orientation based on the operational conditions of the component.

Keywords: strengthening fibers, stress state, ANSYS, torsion, shear stress, surface hardening.

1. Введение

Повышение эксплуатационной надёжности цилиндрических деталей, работающих в условиях кручения, требует особого внимания к состоянию их поверхностного слоя. Одним из эффективных способов усиления внешней оболочки таких заготовок является формирование упрочнённой структуры с направленной текстурой путём поверхностного пластического деформирования (ППД). Направление волокон, возникающих в процессе ППД, способно существенно влиять на распределение напряжений, долговечность и устойчивость материала к разрушению [1, 2].

В большинстве известных исследований рассматривались волокна, ориентированные вдоль или поперёк оси, как правило, при растяжении, изгибе или контактных нагрузках [3, 4]. Однако поведение цилиндрических образцов при кручении с учётом пространственной ориентации упрочнённых волокон, особенно под наклонными углами к оси, на сегодняшний день изучено недостаточно. Между тем, именно при кручении возникает выраженная чувствительность напряжённого состояния к направлению структуры, связанная с характером скручивающих напряжений и формированием касательных деформаций [5, 6].

С учётом этого актуальной является задача количественной оценки влияния ориентации волокон на напряжённое состояние при кручении. Настоящая работа направлена на установление взаимосвязи между направлением упрочнённой текстуры и механическим поведением материала под действием крутящего момента на основе численного моделирования.

В связи с этим в настоящей работе реализовано конечно-элементное моделирование с использованием среды ANSYS, позволяющее количественно оценить влияние ориентации волокон на напряжённое состояние образцов.

2. Методика моделирования

Для исследования влияния ориентации упрочнённого слоя на напряжённое состояние цилиндрических образцов при кручении выполнено численное моделирование в среде ANSYS 23.2 [7, 8]. В модели упрочнённый слой представлен системой цилиндрических волокон диаметром d , плотно уложенных на поверхность основного стержня диаметром D под углами $\alpha = 0^\circ, 45^\circ$ и 90° относительно оси образца (рис. 1). Все волокна жёстко соединены между собой и с основным телом.

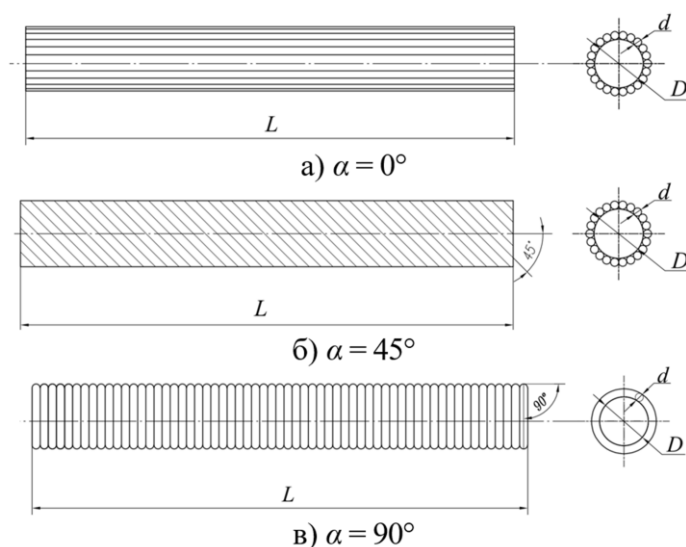


Рисунок 1. Схемы расположения упрочнённых волокон на поверхности цилиндрических заготовок

Характеристики образцов. В качестве заготовки использован цилиндр длиной $L = 300$ мм и диаметром $D = 30$ мм из стали 45 с упруго-пластическими свойствами: $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, $\mu = 0,3$, билинейная диаграмма (предел текучести при кручении $\tau_T = 206$ МПа, предел прочности при кручении $\tau_B = 348$ МПа, модуль упрочнения $E_T = 2000$ МПа). Упрочнённые волокна диаметром $d = 5$ мм выполнены из стали 50 с аналогичными параметрами (E, μ, E_T), но с более высокими пределами: $\tau_T = 216$ МПа, $\tau_B = 363$ МПа.

Нагружение осуществлялось крутящим моментом M , приложенным к одному концу, при жёстком закреплении другого. Сетка — тетраэдрическая с шагом 1 мм, включает 23500 конечных элементов и 124436 узлов. Контакт между волокнами — безззорный, без трения. Схема нагружения и конечно-элементная модель представлены на рис. 2.

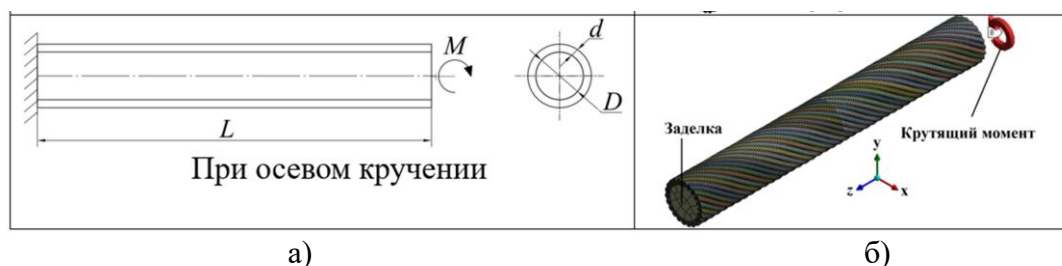


Рисунок 2. Схемы нагружения и конечно-элементные модели цилиндрических образцов

Для оценки напряжённого состояния при кручении цилиндрических образцов рассчитывалась интенсивность касательных напряжений по Мизесу (τ_i^{BP}) на плоскостях Oxy , Oyz и Oxz . Интенсивность определялась по выражению [9, 10]:

$$\tau_i^{BP} = \frac{1}{3} \sqrt{6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)} \quad (1)$$

Построенная модель позволила провести серию расчётов, результаты которых приведены ниже.

3. Результаты расчёта при кручении образцов

На рисунке 3 представлены распределения компонент касательных напряжений τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{xz} по радиусу поперечного сечения образцов при различных углах ориентации упрочнённых волокон α . При $\alpha = 0^\circ$ напряжение τ_{xz} возрастает до 190 МПа на расстоянии $R = 15$ мм, затем незначительно снижается. Компонента τ_{xy} изменяется от нуля в центре до -190 МПа на периферии, а τ_{yz} остаётся близкой к нулю по всей толщине.

При $\alpha = 45^\circ$ наблюдается равномерный рост τ_{xz} до 190 МПа при $R \approx 16,25$ мм, далее наблюдается лёгкое снижение. Компоненты τ_{xy} и τ_{yz} проявляют слабые колебания в приповерхностной зоне, что указывает на минимальное влияние наклонной ориентации волокон на деформацию сдвига.

При $\alpha = 90^\circ$ компонент τ_{xz} достигает 139 МПа при $R = 15$ мм, а τ_{xy} опускается до -100 МПа в той же области, что соответствует зоне геометрической неоднородности. Напряжения τ_{yz} остаются низкими.

Таким образом, максимальные значения касательных напряжений наблюдаются в зоне $R \approx 15$ мм, соответствующей внешнему слою упрочнения. Основной вклад в напряжённое состояние при кручении вносит компонент τ_{xz} , особенно выраженный при ориентации волокон под углами $\alpha = 0^\circ$ и 45° .

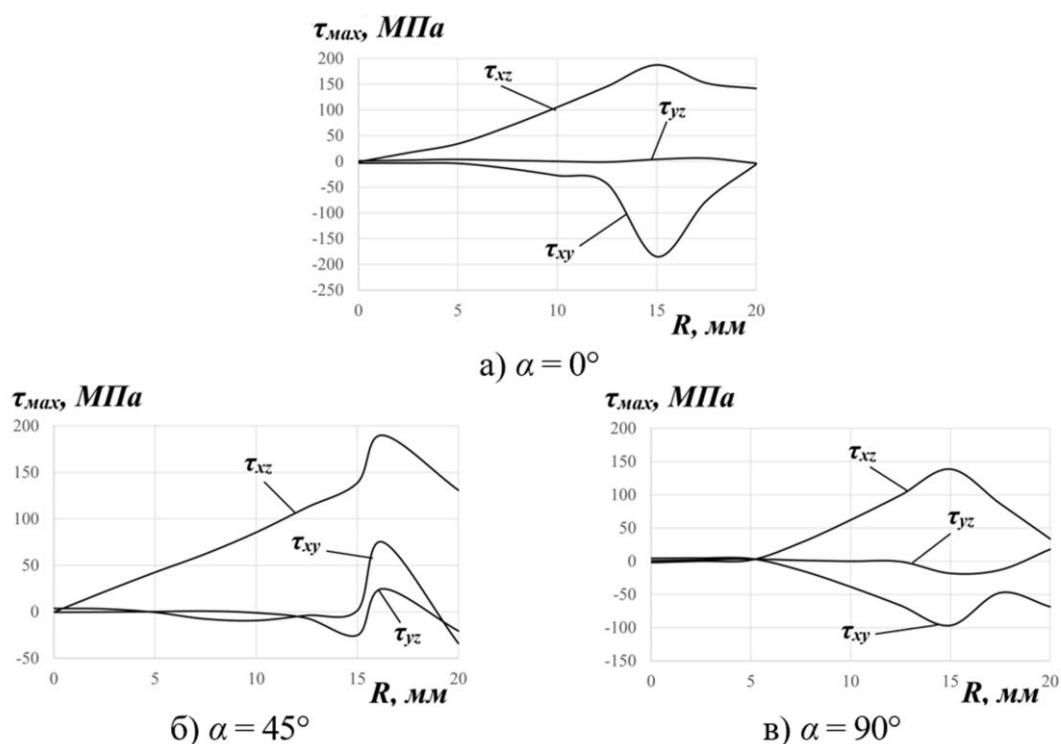


Рисунок 3. Изменение касательных напряжений (τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{xz}) по радиусу цилиндрических образцов при кручении ($M = 1,77$ кН·м)

На рисунке 4 приведены поля распределения интенсивности касательных напряжений в поперечном сечении цилиндрических образцов при крутящем моменте $M = 1,77$ кН·м. Показано, как изменение угла ориентации упрочнённых волокон влияет на уровень и характер напряжённого состояния.

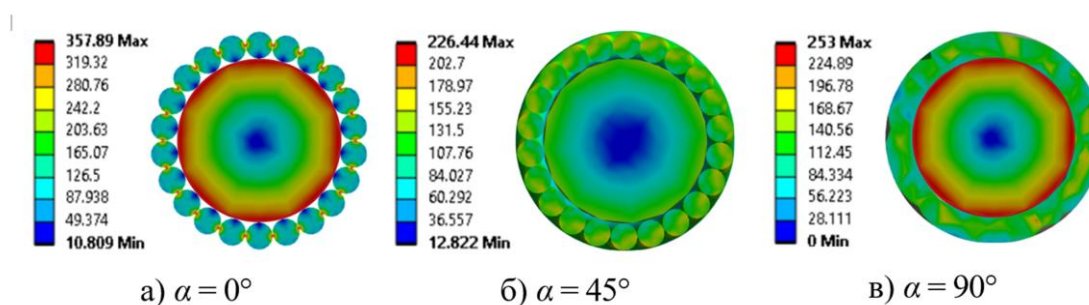


Рисунок 4. Интенсивность касательных напряжений в поперечном сечении образцов при разных углах ориентации волокон ($M = 1,77$ кН·м)

При $\alpha = 0^\circ$ максимальная интенсивность касательных напряжений достигает 357,89 МПа, а минимальная составляет 10,81 МПа. Высокие значения напряжений сосредоточены в приповерхностной зоне, что отражается преобладанием красных и оранжевых оттенков, тогда как центральная часть нагружена существенно меньше (синий цвет).

При $\alpha = 45^\circ$ напряжения распределяются более равномерно по сечению: максимум составляет 226,44 МПа, минимум — 12,82 МПа. Зеленые зоны вдоль

наружного контура указывают на снижение концентрации касательных напряжений, что потенциально повышает устойчивость материала к локальным перегрузкам.

Для $\alpha = 90^\circ$ интенсивность касательных напряжений достигает 253 МПа, а минимальное значение — 0 МПа. Распределение напряжений в этом случае также является достаточно равномерным, однако уступает по однородности варианту с $\alpha = 45^\circ$. При этом области пиков остаются в зонах контакта волокон с основным телом.

На рис. 5 представлены результаты распределения интенсивности касательных напряжений в продольном сечении цилиндрических образцов при различных ориентациях упрочнённых волокон ($\alpha = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$).

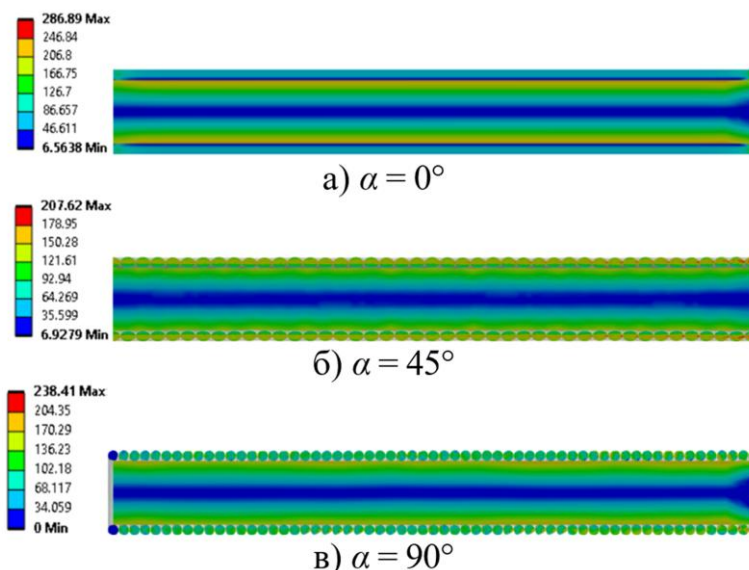


Рисунок 5. Продольные поля касательных напряжений при кручении образцов с различной ориентацией волокон ($M = 1,77 \text{ кН}\cdot\text{м}$)

При $\alpha = 0^\circ$ наблюдается выраженная концентрация напряжений в верхней и нижней зонах образца — максимальные значения достигают 286,89 МПа, в то время как в центральной части напряжения минимальны (до 6,56 МПа). Такая картина указывает на высокую несущую способность вдоль оси, но сопровождается риском локальных перегрузок.

В случае $\alpha = 45^\circ$ напряжения распределяются значительно равномернее: преобладание зелёных и голубых тонов указывает на снижение амплитуды колебаний. Максимальное значение уменьшается до 207,62 МПа, а минимум возрастает до 6,92 МПа, что потенциально улучшает устойчивость к сложным видам нагружения.

При $\alpha = 90^\circ$ вновь наблюдаются зоны концентрации напряжений по периферии, но менее выраженные, чем при $\alpha = 0^\circ$. Максимальная интенсивность достигает 238,41 МПа, оставаясь между предыдущими случаями. Внутренние зоны поперечного сечения, по-прежнему менее нагружены.

Таким образом, наибольшая равномерность распределения касательных напряжений вдоль оси достигается при $\alpha = 45^\circ$, что делает данный угол наиболее рациональным с точки зрения устойчивости конструкции при кручении.

На рисунке 6 представлена зависимость между величиной крутящего момента M и максимальной интенсивностью касательных напряжений τ_i при разной ориентации упрочнённых волокон ($\alpha = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$).

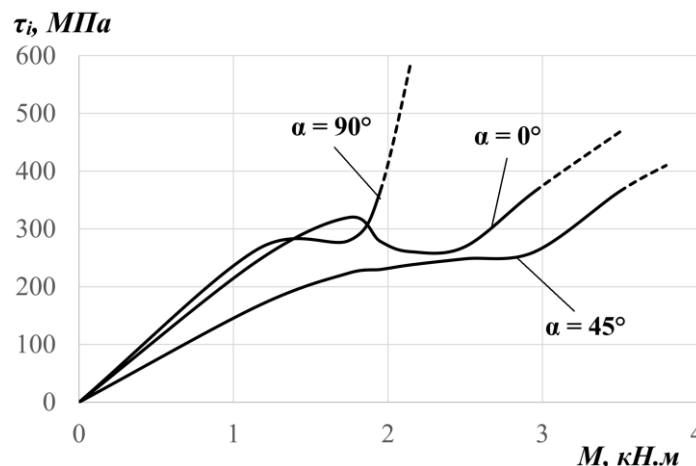


Рисунок 6. Зависимость максимальных касательных напряжений от крутящего момента при различной ориентации упрочнённых волокон

При $\alpha = 90^\circ$ предел текучести ($\tau_T = 216$ МПа) достигается уже при $M = 0,95$ кН·м, тогда как для $\alpha = 0^\circ$ он наступает при $M = 1,08$ кН·м, а для $\alpha = 45^\circ$ — при $M = 1,47$ кН·м. Это указывает на увеличение сопротивления началу пластической деформации при наклонной ориентации волокон.

Аналогичная тенденция наблюдается и для предела прочности ($\tau_B = 363$ МПа): при $\alpha = 90^\circ$ он достигается при $M = 1,95$ кН·м, при $\alpha = 0^\circ$ — при $M = 2,90$ кН·м, и при $\alpha = 45^\circ$ — при $M = 3,43$ кН·м. Таким образом, ориентация волокон под углом 45° обеспечивает наивысшую прочность при кручении, превышая значение для $\alpha = 90^\circ$ примерно на 75 %.

4. Заключение

Результаты численного моделирования позволяют сделать обоснованные выводы о влиянии ориентации упрочнённых волокон на сопротивление цилиндрических образцов при кручении. Установлено, что наилучшие характеристики прочности достигаются при угле наклона волокон $\alpha = 45^\circ$, при котором обеспечивается наиболее равномерное распределение касательных напряжений и максимальная устойчивость к действующему крутящему моменту. Такая конфигурация способствует снижению локальных концентраций напряжений и замедленному наступлению как предела текучести, так и предела прочности.

При $\alpha = 0^\circ$ волокна ориентированы вдоль оси заготовки, что приводит к снижению сопротивления кручению, хотя прочностные характеристики остаются выше, чем при перпендикулярной ориентации. В случае $\alpha = 90^\circ$, когда волокна расположены поперечно к оси образца, наблюдается наименьшая прочность, обусловленная усилением локальных перегрузок и неравномерным распределением напряжений.

Таким образом, традиционные схемы упрочнения с перпендикулярной ориентацией волокон не обеспечивают высокой эффективности при кручении. Оптимальный выбор угла наклона упрочнённых волокон должен производиться с учётом типа нагружения, требуемых механических характеристик и условий эксплуатации. Анализ всех полученных данных показывает устойчивую закономерность: наклон волокон под углом 45° обеспечивает как структурную равномерность, так и максимальную устойчивость при кручении. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании деталей, работающих в условиях знакопеременного кручения, например, в машиностроении, энергетике и авиации.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Santos, V., Uddin, M., Hall, C. Mechanical surface treatments for controlling surface integrity and corrosion resistance of Mg alloy implants: A review // *Journal of Functional Biomaterials*. – 2023. – Vol. 14. – Pp. 1–34.
2. Тамаркин, М. А., Тищенко, Э. Э., Лебедеко, В. Г. Повышение качества поверхностного слоя деталей при обработке поверхностным пластическим деформированием в гибких гранулированных средах // *Вестник ДГТУ*. – 2009. – Т. 9, № 3(42). – С. 213–224.
3. Ветрова, Е. А. Формирование шероховатости поверхностного слоя нежестких деталей типа полый цилиндр в процессе комбинированной обработки резанием и поверхностным пластическим деформированием // *Известия МГТУ МАМИ*. – 2012. – Т. 2, № 2 (14). – С. 38–41.
4. Roland, T., Restraint, D., Lu, K., Lu, J. Fatigue life improvement through surface nanostructuring of stainless steel by means of surface mechanical attrition treatment // *Scripta Materialia*. – 2006. – Vol. 54, Issue 11. – Pp. 1949–1954.
5. Кабатов, А. А. Анализ финишных методов обработки поверхностным пластическим деформированием // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*. – 2013. – № 58. – С. 49–54.
6. Осипок, Т. В., Зайдес, С. А. Оценка неоднородности распределения механических свойств в листовом прокате из низкоуглеродистой стали // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. – 2021. – № 6. – С. 45–54.
7. Паршин, С. В. Конечно-элементное моделирование в решении прочностных задач машиностроения / С. В. Паршин. – Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2024. – 68 с.
8. Жидков, А. В. Применение системы ANSYS к решению задач геометрического и конечно-элементного моделирования / А. В. Жидков. – Нижний Новгород: ННГАСУ, 2006. – 115 с.
9. Кожаринова, Л. В. Основы теории упругости и пластичности / Л. В. Кожаринова. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2010. – 136 с. ISBN 978-5-93093-712-1.
10. Новожилов, В. В. Теория упругости / В. В. Новожилов. – 9-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Политехника, 2012. – 409 с. ISBN 978-5-7325-0956-4.

Поступила в редколлегию 15.04.2025 г.