

УДК 621.787.4

## Оценка влияния направления упрочненных армированных волокон на деформирующую способность цилиндрических деталей

С.А. Зайдес, Тхань Тьунг Ле

ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

## Assessment of the reinforced fiber direction influence on deformability of the cylindrical parts

S.A. Zaides, Thanh Chung Le

Irkutsk National Research Technical University

На основе конечно-элементного моделирования в компьютерной программе ANSYS исследовано влияние ориентации армированных волокон на деформационные характеристики цилиндрических деталей при растяжении, изгибе и кручении. При растяжении и кручении продольное расположение волокон обеспечивает максимальную жесткость и прочность, а поперечное повышает пластичность и способность к поглощению энергии деформаций. При изгибе продольное расположение волокон также обеспечивает наибольшую жесткость, тогда как поперечное расположение волокон вызывает наибольший прогиб и целесообразно при значительных деформациях. Полученные результаты можно использовать для выбора направления волокон в зависимости от условий нагружения и требований к прочности и пластичности деталей.

EDN: OHOISU, <https://elibrary/oho>

**Ключевые слова:** упрочненные волокна, деформирование материала, метод конечных элементов, угол наклона волокон, прочность материала, компьютерное моделирование

The paper analyzes the influence of the reinforced fiber orientation on deformation characteristics of the cylindrical parts under tension, bending and torsion using the finite element simulation in the ANSYS software program. Under tension and torsion, the fiber longitudinal arrangement provides maximum rigidity and strength, while the transverse arrangement increases plasticity and the ability to absorb the deformation energy. Under bending, the fiber longitudinal arrangement also provides the greatest rigidity, while its transverse arrangement causes the highest deflection and is advisable for the significant deformations. The obtained results could be introduced in selection of the fiber direction depending on the loading conditions and requirements for the strength and plasticity of parts.

EDN: OHOISU, <https://elibrary/oho>

**Keywords:** reinforced fiber, material deformation, finite element method, fiber inclination angle, material strength, computer simulation

Детали машин проектируют так, чтобы при эксплуатации они испытывали только обратимые упругие деформации. Если же напряжения превышают предел упругости, то появляются необратимые пластические деформации, нарушающие работоспособность машин и оборудования [1–3].

Надежность любой конструкции зависит от запаса упругой энергии, т. е. от способности материала сопротивляться внешним воздействиям. Хрупкие материалы под действием предельной нагрузки разрушаются практически мгновенно, так как такую деформацию сложно зафиксировать и предотвратить [4, 5].

Разрушение пластичных материалов происходит значительно медленнее, что позволяет отследить развитие трещин и вовремя принять меры для устранения аварийных ситуаций [6, 7].

Объем накопленной при упругой деформации тела энергии также оказывает существенное влияние на работоспособность деталей машин. Во-первых, большой объем накопленной упругой энергии очень важен для надежной работы деталей машин и элементов конструкций при эксплуатации. Повышенный запас упругой деформации гарантирует сохранение размеров и формы тела от необратимых изменений. Во-вторых, упругая энергия служит некоторым демпфером при воздействии постоянных и особенно знакопеременных нагрузок, предотвращая появление необратимых пластических деформаций, возникающих при силовых перегрузках.

Особенно важна роль потенциальной энергии для деталей, испытывающих знакопеременный изгиб и кручение. Такими примерами могут служить пластинчатые рессоры и торсионные валы, эффективность которых зависит от упругой энергии. Если ее будет недостаточно, то механические системы, например автомобильный транспорт, будут обладать более жесткой конструкцией, что отрицательно скажется как на его долговечности, так и на комфортных условиях для людей, перевозимых на транспорте.

На практике для изготовления таких деталей обычно используют пружинно-рессорные стали с повышенными характеристиками упругости материала. Для этого применяют углеродистые и высокоуглеродистые стали с добавками хрома, марганца, никеля и других легирующих элементов [8]. Однако такие стали, хотя и обладают высокими характеристиками прочности и упругости, имеют низкую пластичность, а сле-

довательно, весьма высокую скорость разрушения, что может привести к внезапному выходу из строя изделий машиностроения.

Для сохранения пластичности основного металла и формирования более твердого поверхностного слоя деталей, который в первую очередь воспринимает силовые и температурные воздействия, широко применяют отделочно-упрочняющую обработку поверхностным пластическим деформированием (ППД) [9].

Традиционные способы ППД формируют винтовые следы от пластической деформации, имеющие весьма малый шаг. Такие следы можно считать расположенными перпендикулярно к оси обрабатываемой цилиндрической заготовки. В то же время известны способы и устройства, формирующие пластические следы, направленные параллельно или под небольшим углом к оси заготовки [10].

Таким образом, топография упрочненной поверхности может иметь разную конфигурацию, оказывающую различное влияние на эксплуатационные свойства деталей машин. Например, экспериментальными исследованиями установлено влияние направления пластического следа от механической обработки на усталостную прочность, износостойкость, прочность прессовых соединений, плавность хода подвижных соединений, стабильность электрических сигналов и другие эксплуатационные характеристики [11, 12].

ППД позволяет сгладить микронеровности поверхности и упрочнить поверхностный слой, но характеристики пластичности при этом имеют пониженные значения. Следовательно, возникает вопрос о влиянии направления пластического следа обработки на характеристики пластичности при таких простых видах нагружения, как поперечный изгиб, осевое растяжение и осевое кручение.

Цель работы — оценка влияния направления упрочненных армированных волокон материала на деформированное состояние цилиндрических деталей при простых видах нагружения.

**Данные для конечно-элементного моделирования.** Для оценки эффективности механической обработки и определения напряженно-деформированного состояния деталей машин применяют компьютерное моделирование, основанное на методе конечных элементов. Одной из известных и широко используемых программ, эффективно реализующих этот метод,

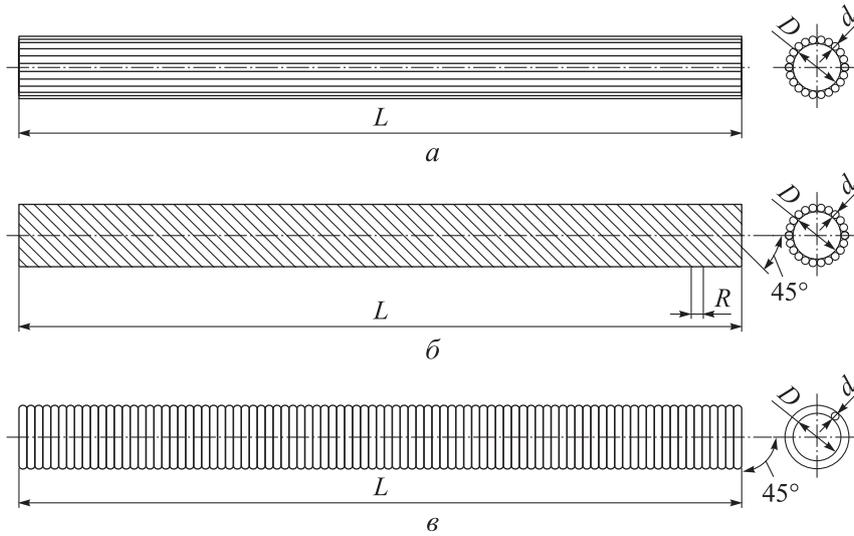


Рис. 1. Схемы расположения упрочненных волокон на поверхности цилиндрических заготовок: а — прямые; б — наклонные (под углом 45°); в — перпендикулярные к оси заготовки

является программа ANSYS [13, 14], которая и была применена в данной работе.

Чтобы достичь поставленной цели, упрочненный слой цилиндрической заготовки представлен в виде материальных волокон цилиндрической формы диаметром  $d$  (рис. 1).

Для определения напряженно-деформированного состояния заготовки выбраны следующие граничные условия (рис. 2, а-е). При рас-

тяжении (см. рис. 2, а и б) заготовка зафиксирована одним концом неподвижно путем заделки, а к другому концу приложена центральная растягивающая сила  $F$ . При изгибе (см. рис. 2, в и г) заготовка зафиксирована с обоих концов по принципу шарнир — шарнир, в центре на нее действует сосредоточенная сила  $F$ . При осевом кручении (см. рис. 2, д и е) заготовка зафиксирована неподвижно с одного конца

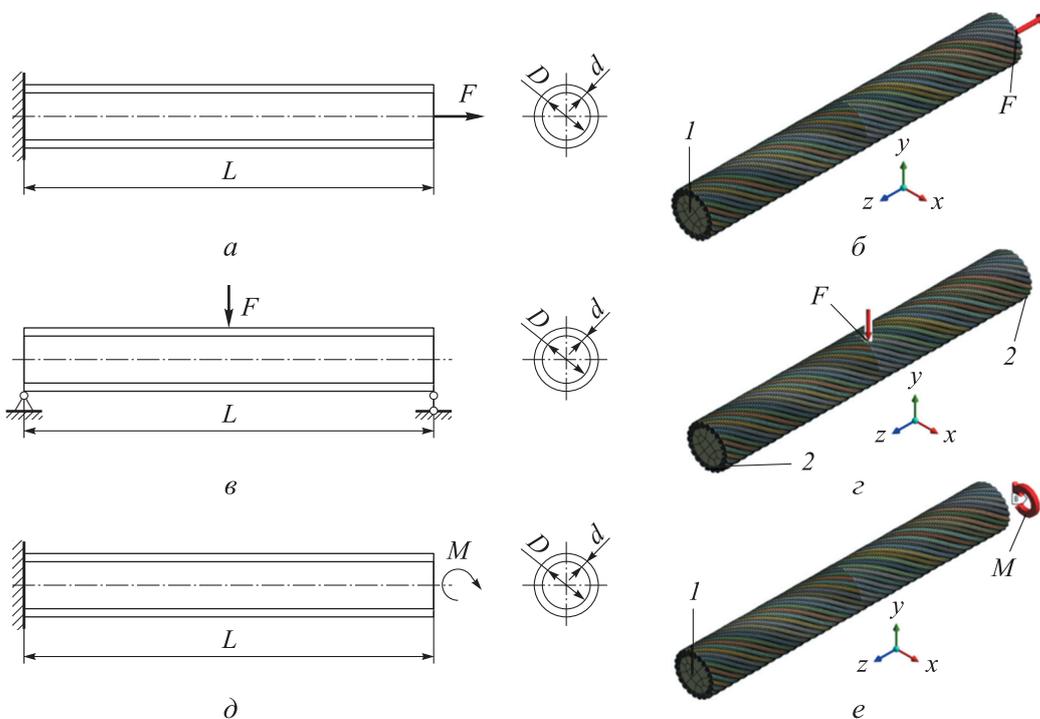


Рис. 2. Схемы нагружения (а, в, д) и конечно-элементные модели (б, г, е) цилиндрических образцов: а, б — при центральном растяжении; в, г — при поперечном изгибе; д, е — при осевом кручении; 1 — заделка; 2 — шарнир

путем заделки, а на другом конце приложен крутящий момент  $M$ .

Характеристики образца: в качестве заготовок длиной  $L = 300$  мм использованы цилиндрические образцы диаметром  $D = 30$  мм; материал — сталь 45 — упрочняющийся упругопластический; модуль упругости  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа; коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ ; диаграмма деформирования материала — билинейная (предел текучести  $\sigma_T = 355$  МПа, предел прочности  $\sigma_B = 600$  МПа, модуль упрочнения  $E_T = 2$  ГПа).

Периферийные стержни диаметром  $d = 5$  мм: материал — сталь 50 — упрочняющийся упругопластический; модуль упругости  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа; коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ ; диаграмма деформирования материала — билинейная (предел текучести  $\sigma_T = 375$  МПа, предел прочности  $\sigma_B = 630$  МПа, модуль упрочнения  $E_T = 2$  ГПа; предел текучести при кручении  $\tau_T = 216$  МПа; предел прочности при кручении  $\tau_B = 363$  МПа).

С помощью CAD/CAE-системы ANSYS 23.2 создана конечно-элементная форма цилиндрического образца со следующими параметрами: сетка квадратной формы с размером 1 мм, содержащая 47 100 конечных элементов и 248 872 узла. Соединение волокон друг с другом и волокна с центральным стержнем — прочное и без трения.

Максимальное удлинение вала при центральном растяжении найдено методом Коши — Крылова [15] по формуле

$$\Delta l = \frac{Fl}{EA},$$

где  $l$  и  $A$  — длина и площадь поперечного сечения образца.

С помощью метода Мора [16] определен максимальный прогиб вала при поперечном изгибе

$$\Delta y_{\max} = \frac{Fl^3}{48EI},$$

где  $I$  — осевой момент инерции поперечного сечения вала.

Относительный угол закручивания при кручении вычислен по методу Журавского [17] следующим образом:

$$\gamma = \frac{M}{GI_p},$$

где  $G$  — модуль упругости при сдвиге;  $I_p$  — полярный момент инерции.

Оценка деформированного состояния проведена по интенсивности относительной деформации, которая, как и напряжение, распределяется в направлении трех главных осей координат и определяется по следующей формуле [18]:

$$\varepsilon_i = \sqrt{\frac{1}{2} [(\varepsilon_x - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_x - \sigma_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2]},$$

где  $\sigma_y$  — компонента напряжения в направлении оси  $y$ .

**Результаты расчета при растяжении образцов.** Распределения компонент относительной деформации  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ ,  $\varepsilon_z$  по поперечному сечению цилиндрических образцов при растяжении силой  $F = 60$  кН ( $\sigma_i < \sigma_T$ ) и  $F = 350$  кН ( $\sigma_i > \sigma_T$ ) с углом наклона упрочненных волокон  $\alpha = 0, 45$  и  $90^\circ$  приведены на рис. 3, *a–e*.

В случае расположения упрочненных волокон вдоль оси образца ( $\alpha = 0^\circ$ )  $\varepsilon_z = 0,26 \cdot 10^{-3}$  при силе  $F = 60$  кН и  $\varepsilon_z = 0,15 \cdot 10^{-2}$  при  $F = 350$  кН. Компоненты относительной деформации  $\varepsilon_x$  и  $\varepsilon_y$  имеют отрицательный знак (уменьшение размеров поперечного сечения) и близки к нулю ( $-0,08 \cdot 10^{-3}$ ).

При расположении упрочненных волокон под углом  $\alpha = 45^\circ$  распределения деформаций практически не отличается от таковых при  $\alpha = 0^\circ$ . Небольшое искажение компонент относительной деформации  $\varepsilon_x$  и  $\varepsilon_y$  выявлено в периферийной области, но это обусловлено геометрической неоднородностью принятой модели. В зоне пластических деформаций значения  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  и  $\varepsilon_z$  существенно увеличились, особенно  $\varepsilon_z$ , которая достигла 0,015.

При расположении упрочненных волокон перпендикулярно к оси образца ( $\alpha = 90^\circ$ ) деформация в направлении оси  $z$  увеличивается до  $1,11 \cdot 10^{-3}$ , если  $F = 60$  кН, и до 0,16, если  $F = 350$  кН.

Зависимости интенсивности относительной деформации  $\varepsilon_i$  цилиндрических образцов от интенсивности временного напряжения  $\sigma_i$  при растяжении с углом наклона упрочненных волокон  $\alpha = 90, 45$  и  $0^\circ$  показаны на рис. 4. Видно, что интенсивность относительной деформации практически не зависит от направления упрочненных волокон до тех пор, пока интенсивность временного напряжения не достигнет предела текучести материала ( $\sigma_T = 375$  МПа).

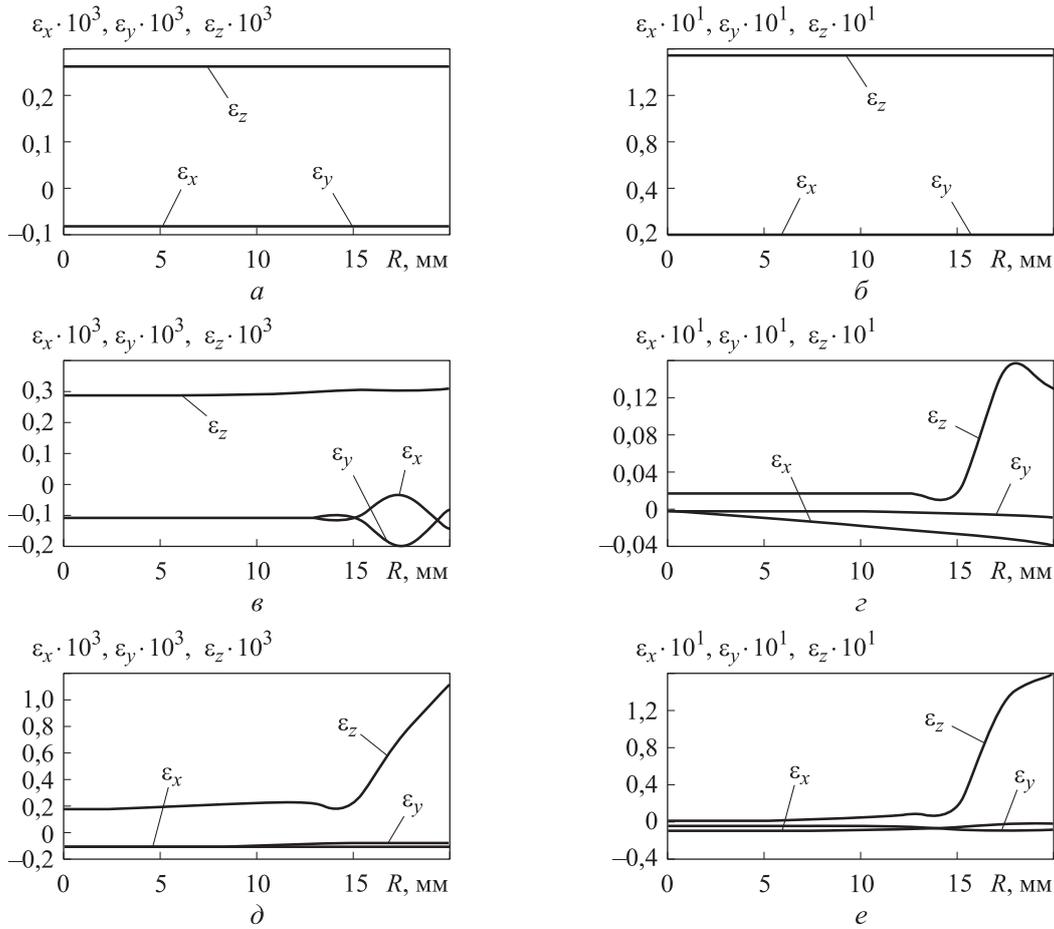


Рис. 3. Распределения компонент относительной деформации  $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$  по поперечному сечению цилиндрических образцов при растяжении силой  $F = 60$  (а, в, д) и 350 кН (б, з, е) с углом наклона упрочненных волокон  $\alpha = 0$  (а, б), 45 (в, з) и 90° (д, е)

Если угол наклона упрочненных волокон  $\alpha = 90^\circ$ , то предел прочности ( $\sigma_b = 630$  МПа) наступает при интенсивности относительной деформации  $\epsilon_i = 0,28$ , если  $\alpha = 45^\circ$  — при  $\epsilon_i = 0,14$ , если  $\alpha = 0^\circ$  — при  $\epsilon_i = 0,13$ . То есть при перпендикулярном расположении упрочненных волокон к оси заготовки интенсивность относительной деформации при достижении предела прочности и при почти в 2 раза большем значении, чем при продольном расположении волокон.

Таким образом, при расположении упрочненных волокон перпендикулярно к оси заготовки интенсивность временного напряжения достигает предела прочности материала после значительной пластической деформации. Такое поведение материала деталей исключает хрупкое разрушение и обеспечивает большую степень надежности металлоконструкций. Расположение упрочненных волокон перпендикулярно к оси заготовки даст положительный эффект и в технологических процессах обра-

ботки металлов давлением. Например, в процессах осадки, вытяжки и отбортовки для формообразования изделий необходима значительная пластическая деформация, которую можно обеспечить специальной конфигурацией структуры поверхности заготовки.

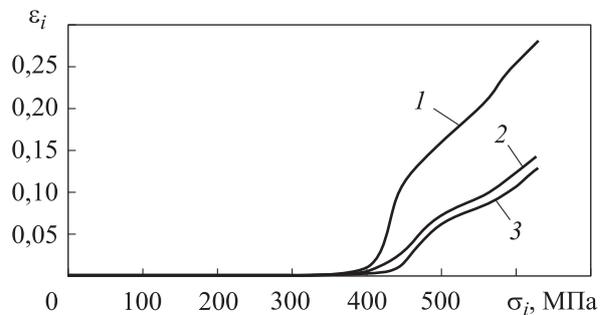


Рис. 4. Зависимости интенсивности относительной деформации  $\epsilon_i$  от интенсивности временного напряжения  $\sigma_i$  при растяжении цилиндрических образцов с углом наклона упрочненных волокон  $\alpha = 90$  (1), 45 (2) и 0° (3)

**Результаты расчета при изгибе образцов.** Так как при упругом изгибе напряжения в растянутой и сжатой зонах равны между собой, рассмотрим деформацию верхних волокон продольного сечения (см. рис. 2, б), где приложена поперечная сила  $F$ . Причем при  $F = 15$  кН деформация образца упругая, а при  $F = 31$  кН — пластическая.

Распределения компонент относительной деформации  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ ,  $\varepsilon_z$  по поперечному сечению цилиндрического образца при изгибе силой  $F = 15$  кН ( $\sigma_i < \sigma_T$ ) и  $F = 31$  кН ( $\sigma_i > \sigma_T$ ) с углом наклона упрочненных волокон  $\alpha = 0, 45$  и  $90^\circ$  приведены на рис. 5, а–е.

Независимо от значения приложенной силы  $F$  характер распределения компонент относительной деформации по сечению образца неизменен: в осевой зоне они равны нулю, а на поверхности поперечного сечения максимальны. Небольшие растягивающие деформации имеют компоненты  $\varepsilon_x$  и  $\varepsilon_y$  при упругой дефор-

мации, а все компоненты при пластической деформации — сжимающие.

При силе  $F = 15$  кН и расположении упрочненных волокон параллельно оси заготовки характер распределения деформаций по сечению образца практически сохранен. При  $\alpha = 90^\circ$  компонента относительной деформации в направлении оси  $z$  меньше ( $\varepsilon_z = -0,79 \cdot 10^{-3}$ ), чем при  $\alpha = 45^\circ$  ( $\varepsilon_z = -1,2 \cdot 10^{-3}$ ). Отсюда следует, что при расположении волокон параллельно оси заготовки, жесткость образца при изгибе больше, чем при других углах  $\alpha$ . Значения  $\varepsilon_x$  и  $\varepsilon_y$  в трех случаях имеют небольшое отклонение в периферийной зоне.

При силе  $F = 31$  кН и  $\alpha = 90^\circ$  значения компонент относительной деформации выше, чем при других углах  $\alpha$ . При  $\alpha = 90^\circ$  компонента относительной деформации  $\varepsilon_z = -0,021$ , при  $\alpha = 0^\circ$   $\varepsilon_z = -3,36 \cdot 10^{-3}$ , при  $\alpha = 45^\circ$   $\varepsilon_z = -2,5 \cdot 10^{-3}$ . В этом случае изгибная жесткость образца наименьшая, что необходимо учитывать при

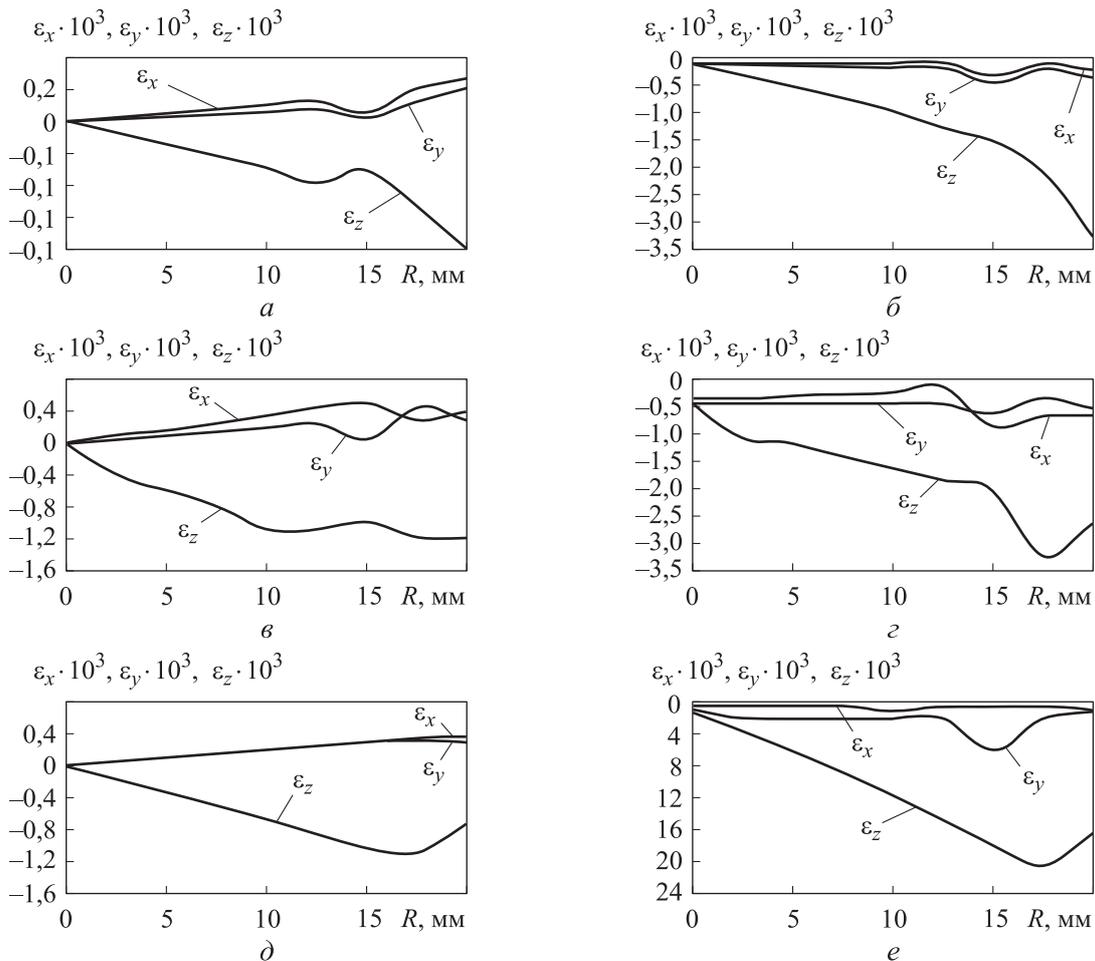


Рис. 5. Распределения компонент относительной деформации  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ ,  $\varepsilon_z$  по поперечному сечению цилиндрического образца при изгибе силой  $F = 15$  (а, в, д) и 31 кН (б, з, е) с углом наклона упрочненных волокон  $\alpha = 0$  (а, б),  $45$  (в, з) и  $90^\circ$  (д, е)

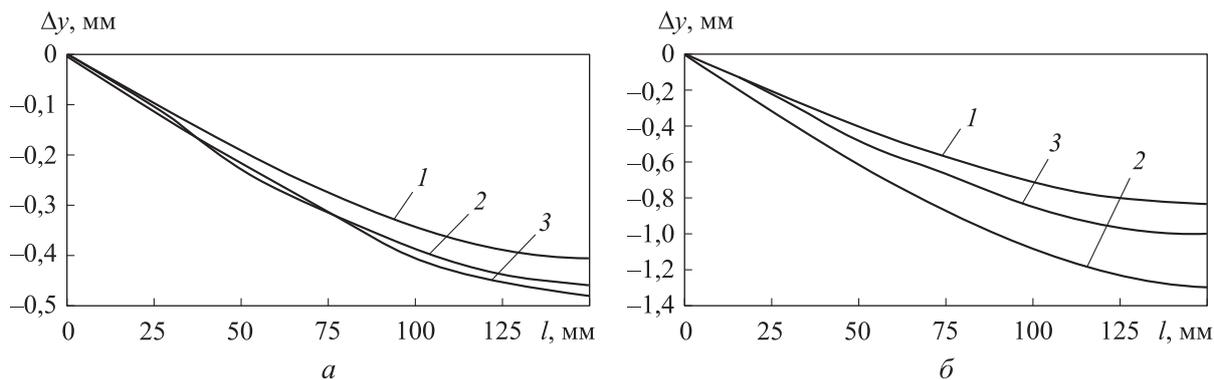


Рис. 6. Распределения абсолютного прогиба  $\Delta y$  по длине цилиндрического образца  $l$  при изгибе силой  $F = 15$  (а) и  $31$  кН (б) с углом наклона упрочненных волокон  $\alpha = 0$  (1),  $90$  (2) и  $45^\circ$  (3)

выборе способа упрочнения валов, работающих на изгибе с кручением.

Таким образом, увеличение угла наклона упрочненных волокон приводит к усилению интенсивности деформации, особенно вблизи радиуса  $15 \dots 20$  мм, что также обусловлено конструктивными особенностями принятой модели.

Распределения абсолютного прогиба  $\Delta y$  по длине цилиндрического образца  $l$  при изгибе силой  $F = 15$  ( $\sigma_i < \sigma_T$ ) и  $31$  кН ( $\sigma_i > \sigma_T$ ) с углом наклона упрочненных волокон  $\alpha = 0, 45$  и  $90^\circ$  приведены на рис. 6, а и б.

При  $F = 15$  кН прогиб  $\Delta y$  достигает максимального значения в центральной части образца, где приложена поперечная сила, и постепенно уменьшается к его краям. При  $\alpha = 0^\circ$  максимальное значение прогиба составило  $-0,41$  мм, при  $\alpha = 45^\circ$  —  $-0,48$  мм, при  $\alpha = 90^\circ$  —  $-0,46$  мм. Таким образом, при упругой деформации наибольший прогиб образца наблюдается при  $\alpha = 45^\circ$ .

Аналогичная зависимость прослеживается при силе  $F = 31$  кН, когда напряжения превышают предел текучести. Изменение прогибов имеет ту же закономерность, что и при  $F = 15$  кН. Для  $\alpha = 0^\circ$  максимальное значение прогиба  $\Delta y = -0,84$  мм, для  $\alpha = 45^\circ$  —  $\Delta y = -1,01$  мм, для  $\alpha = 90^\circ$  —  $\Delta y = -1,30$  мм. Следовательно, при  $F = 31$  кН наибольший прогиб наблюдается при  $\alpha = 90^\circ$ , а наименьший — при  $\alpha = 0^\circ$ .

Сравнивая эти результаты со значениями деформации, приведенными на рис. 5, можно сделать вывод, что в области упругой деформации изгиб и деформация находятся в линейно пропорциональной зависимости. Так, при угле  $\alpha = 45^\circ$  деформация и прогиб достигают наибольших значений во всех случаях. Однако в

области пластической деформации в некоторых случаях этот вывод может быть некорректным. В частности, при  $\alpha = 90^\circ$  прогиб и деформация имеют максимальные значения, но при  $\alpha = 0^\circ$  деформация больше, чем при  $\alpha = 45^\circ$ , тогда как прогиб меньше.

Зависимости максимального прогиба  $\Delta y$  от интенсивности временного напряжения  $\sigma_i$  при изгибе цилиндрического образца с углом наклона упрочненных волокон  $\alpha = 0, 45$  и  $90^\circ$  приведены на рис. 7. При достижении интенсивностью временных напряжений предела упругости ( $\sigma_T = 375$  МПа) максимальное значение прогиба соответствует углу наклона упрочненных волокон  $\alpha = 45^\circ$  и составляет  $0,79$  мм, тогда как его минимальное значение  $0,52$  мм зафиксировано при  $\alpha = 0^\circ$ .

Если интенсивность временного напряжения превышает предел текучести материала, то максимальное значение прогиба наблюдается при  $\alpha = 90^\circ$  и достигает  $4,7$  мм, в то время как его минимальное значение составляет  $3,1$  мм при  $\alpha = 0^\circ$ .

Таким образом, в области упругой деформации максимальные значения прогиба наблюда-

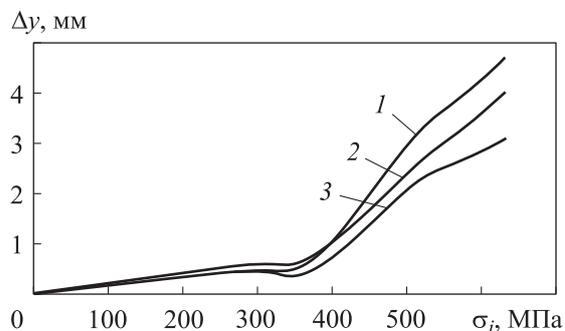


Рис. 7. Зависимости максимального прогиба  $\Delta y$  от интенсивности временного напряжения  $\sigma_i$  при изгибе цилиндрического образца с углом наклона упрочненных волокон  $\alpha = 90$  (1),  $45$  (2) и  $0^\circ$  (3)

ются при  $\alpha = 45^\circ$ , однако при превышении предела текучести материала максимальный прогиб соответствует углу  $\alpha = 90^\circ$ .

При угле наклона упрочненных волокон  $\alpha = 45^\circ$  материал демонстрирует наибольшее сопротивление к упругим деформациям, что делает его оптимальным для конструкций, работающих в пределах упругости ( $\sigma_i \leq 375$  МПа). Это особенно важно для элементов авиационных изделий, автомобильных корпусов и спортивного инвентаря, где требуется высокая сопротивляемость малым и средним изгибным нагрузкам без остаточной деформации.

При  $\alpha = 90^\circ$  материал выдерживает меньший прогиб в упругой области, но при превышении предела текучести он показывает наибольшую деформационную способность. Это делает его более подходящим для изделий, работающих в зоне пластических деформаций, применяемых в судостроении, трубопроводах и мостовых конструкциях, где важна способность материала поглощать энергию и выдерживать экстремальные нагрузки без разрушения.

**Результаты расчета при кручении образцов.** Рассмотрим деформационное состояние цилиндрических образцов при упругих и пластических деформациях в зависимости от направления упрочненных волокон.

Распределения компонент абсолютного угла закручивания  $\vartheta_x, \vartheta_y, \vartheta_z$  по поперечному сечению цилиндрического образца при кручении с моментом  $M = 0,90$  кН·м ( $\tau_i < \tau_r$ ) и  $M = 1,77$  кН·м ( $\tau_i > \tau_r$ ) и углом наклона упрочненных волокон  $\alpha = 0, 45$  и  $90^\circ$  приведены на рис. 8.

Установлено, что при  $M = 0,90$  кН·м компонента абсолютного угла закручивания в направлении оси  $x$   $\vartheta_x$  достигает максимального значения на правом конце образца, где приложен крутящий момент, и уменьшается до значений, близких к нулю, на левом конце. При  $\alpha = 0^\circ$  максимальное значение компоненты абсолютного угла закручивания  $\vartheta_x$  составляет  $-0,029$  рад, при  $\alpha = 45^\circ$  —  $-0,024$  рад, при  $\alpha = 90^\circ$  —  $-0,018$  рад. Компоненты абсолютного угла закручивания в направлении осей  $y$  и  $z$

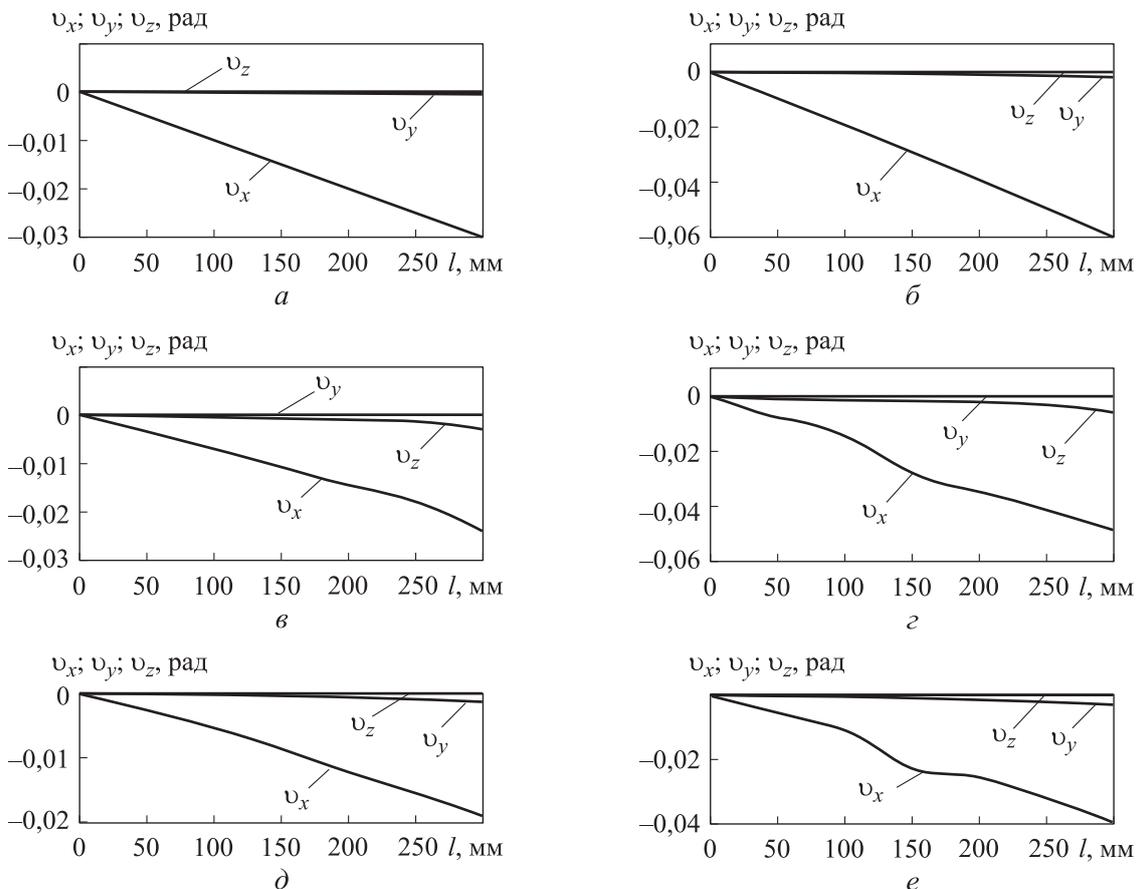


Рис. 8. Распределения компонент абсолютного угла закручивания  $\vartheta_x, \vartheta_y, \vartheta_z$  по поперечному сечению образца при кручении с моментом  $M = 0,90$  (а, в, д) и  $1,77$  кН·м (б, з, е), углом наклона упрочненных волокон  $\alpha = 0$  (а, б),  $45$  (в, з) и  $90^\circ$  (д, е)

весьма малы и свидетельствуют о некоторой деформации поперечного сечения образца при кручении, которой в инженерных работах обычно пренебрегают.

При увеличении крутящего момента до  $M = 1,77$  кН·м напряжения превышают предел текучести, однако закономерность изменения компонент абсолютного угла закручивания сохраняется. При  $\alpha = 0^\circ$  максимальное значение компоненты  $\vartheta_x$  составляет  $-0,059$  рад, при  $\alpha = 45^\circ$  —  $-0,048$ , при  $\alpha = 90^\circ$  —  $-0,039$  рад. Таким образом, для обоих значений крутящего момента наибольший абсолютный угол закручивания наблюдается при  $\alpha = 0^\circ$ , а наименьший — при  $\alpha = 90^\circ$ .

Поля абсолютного угла закручивания в продольном сечении образца при угле наклона упрочненных волокон приведены на рис. 9. При крутящем моменте  $M = 0,90$  кН·м наибольший угол закручивания наблюдается на периферийных слоях правой части заготовки, в зоне приложения крутящего момента. Абсолютный угол закручивания достигает  $-0,029$  рад при  $\alpha = 0^\circ$ ,  $0,026$  рад при  $\alpha = 45^\circ$  и  $0,019$  рад при  $\alpha = 90^\circ$ . Значение абсолютного угла закручивания уменьшается по направлению к сердцевине заготовки и плавно снижается до нуля в области заделки.

При крутящем моменте  $M = 1,77$  кН·м характер распределения деформаций сохраняется. При  $\alpha = 0^\circ$  максимальный угол закручивания достигает  $0,059$  рад, при  $\alpha = 45^\circ$  —  $0,047$  рад, а при  $\alpha = 90^\circ$  —  $0,039$  рад.

Таким образом, наибольшие значения абсолютного угла закручивания сосредоточены в правой части образца, в зоне непосредственного воздействия крутящего момента. По мере приближения к сердцевине абсолютный угол закручивания снижается и стремится к нулю у левого края образца. Увеличение нагрузки приводит к возрастанию абсолютного угла закручивания, причем его максимальное значение зависит от угла наклона упрочненных волокон, что подтверждает влияние ориентации армирующих элементов на механические характеристики образца.

Зависимости относительного угла закручивания  $\gamma$  цилиндрического образца от интенсивности временного касательного напряжения  $\tau_i$  при кручении с углом наклона упрочненных волокон  $\alpha = 0, 45$  и  $90^\circ$  приведены на рис. 10. В области упругой деформации ( $\tau_i < \tau_T$ ) влияние угла наклона упрочненных волокон на начальном этапе незначительное. Однако при достижении предела текучести максимальный относительный угол закручивания составил  $0,113 \cdot 10^{-3}$  для  $\alpha = 0^\circ$ ,  $0,094 \cdot 10^{-3}$  для  $\alpha = 45^\circ$  и  $0,069 \cdot 10^{-3}$  для  $\alpha = 90^\circ$ . Таким образом, в пределах упругой деформации максимальные значения относительного угла закручивания наблюдаются при  $\alpha = 0^\circ$ , а минимальные — при  $\alpha = 90^\circ$ .

Если временное касательное напряжение  $\tau_i$  превышает предел текучести  $\tau_T$ , то характер распределения деформаций сохраняется: максимальное значение относительного угла за-

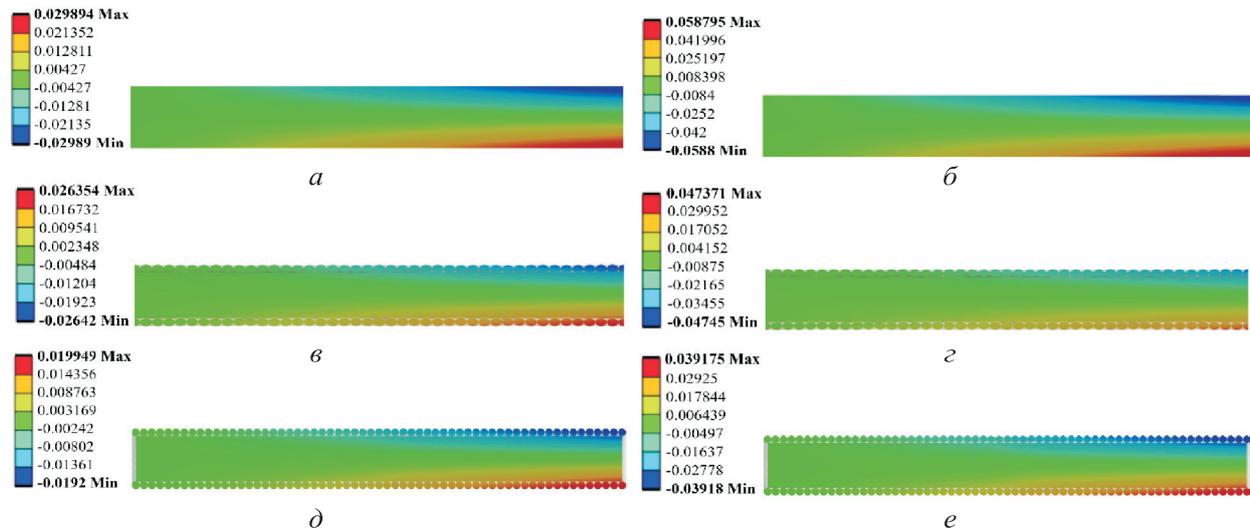


Рис. 9. Поля абсолютного угла закручивания в продольном сечении цилиндрического образца при кручении с моментом  $M = 0,90$  (а, в, д) и  $1,77$  кН·м (б, з, е), углом наклона упрочненных волокон  $\alpha = 0$  (а, б),  $45$  (в, з) и  $90^\circ$

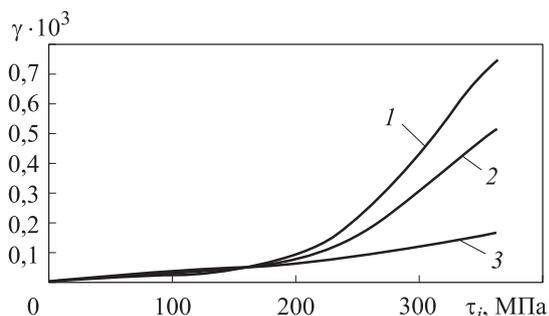


Рис. 10. Зависимости относительного угла закручивания цилиндрического образца  $\gamma$  от интенсивности временного касательного напряжения  $\tau_i$  при кручении с углом наклона упрочненных волокон  $\alpha = 0$  (1),  $45$  (2) и  $90^\circ$  (3)

кручивания составляет  $7,51 \cdot 10^{-4}$  при  $\alpha = 0^\circ$ , а минимальное значение —  $0,161 \cdot 10^{-3}$  при  $\alpha = 90^\circ$ .

Таким образом, в областях упругой и пластической деформации максимальные значения относительного угла закручивания наблюдаются при  $\alpha = 0^\circ$ , а минимальные — при  $\alpha = 90^\circ$ . Это подтверждает значительное влияние направления упрочненных волокон на механическое поведение материала при кручении. В частности, при проектировании валов и труб из стали и сплавов выбор ориентации волокон играет ключевую роль в регулировании их жесткости и сопротивляемости крутящим нагрузкам. Для элементов, работающих в условиях высоких крутящих напряжений, целесообразно использовать продольное армирование ( $\alpha = 0^\circ$ ) с целью повышения прочности, тогда как поперечное армирование ( $\alpha = 90^\circ$ ) подходит для конструкций, где важна сопротивляемость к деформациям.

## Выводы

1. Выполнена оценка влияния угла наклона упрочненных волокон на деформационные характеристики цилиндрических образцов при разных видах нагружения: растяжении, изгибе и кручении. Установлено, что ориентация упрочненных волокон оказывает значительное влияние на сопротивление материалов простым видам деформаций.

2. При растяжении цилиндрического образца наибольшая интенсивность деформации наблюдается для продольного расположения волокон ( $\alpha = 0^\circ$ ), а наименьшая — для поперечного ( $\alpha = 90^\circ$ ). Поэтому для элементов, работающих на растяжение, можно рекомендовать продольное армирование волокон, а для конструкций, требующих повышенной пластичности и поглощения энергии деформации, — поперечное.

3. При изгибе цилиндрического образца наибольшая упругая деформация соответствует расположению упрочненных волокон под углом  $\alpha = 45^\circ$ . Однако при превышении предела текучести максимальная деформация наблюдается при  $\alpha = 90^\circ$ , что свидетельствует о повышенной пластичности материала при такой микрогеометрии поверхности.

4. При кручении максимальные деформации также соответствуют углу наклона упрочненных волокон  $\alpha = 0^\circ$ , а минимальные —  $\alpha = 90^\circ$ . Это подтверждает, что параллельное расположение упрочненных волокон (относительно оси заготовки) обеспечивает высокую жесткость и стойкость к кручению, а перпендикулярное — увеличивает пластичность, но снижает сопротивляемость крутящим нагрузкам.

## Литература

- [1] Витязь П.А., Панин В.Е., Белый А.Б. и др. Механика пластической деформации и разрушения поверхностно упрочненных твердых тел в условиях трения. *Физическая мезомеханика*, 2002, т. 5, № 1, с. 15–28.
- [2] Алиев А.А., Булгаков В.П., Приходько Б.С. Качество поверхности и свойства деталей машин. *Вестник Астраханского государственного технического университета*, 2004, № 1, с. 8–12.
- [3] Смелянский В.М. *Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием*. Москва, Машиностроение, 2002. 299 с.
- [4] Макаров П.В., Еремин М.О. Модель разрушения хрупких и квазихрупких материалов и геосред. *Физическая мезомеханика*, 2013, т. 16, № 1, с. 5–26.
- [5] Kwon Y.W. Revisiting failure of brittle materials. *J. Pressure Vessel Technol.*, 2021, vol. 143, no. 6, art. 064503, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4050989>
- [6] Дерюгин Е.Е. Модель трещины с градиентами пластической деформации. *Физическая мезомеханика*, 2022, т. 25, № 1, с. 43–65, doi: [https://doi.org/10.55652/1683-805X\\_2022\\_25\\_1\\_43](https://doi.org/10.55652/1683-805X_2022_25_1_43)

- [7] Brach S., Tanné E., Bourdin B. et al. Phase-field study of crack nucleation and propagation in elastic-perfectly plastic bodies. *CMAME*, 2019, vol. 353, pp. 44–65, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2019.04.027>
- [8] Makeev D.N. Влияние вводимых легирующих элементов на свойства стали. *Вестник СГТУ*, 2012, № 1, с. 92–98.
- [9] Дорофеев Ю.Г., Михайленко С.С., Бабец А.В. и др. Влияние химико-термической обработки на структуру и свойства низколегированных порошковых сталей. *Известия высших учебных заведений. Северо-кавказский регион. Технические науки*, 2004, № S5, с. 37–40.
- [10] Зайдес С.А., Нгуен Х.Х. Влияние параметров реверсивного поверхностного пластического деформирования на шероховатость упрочненных деталей. *Вестник ВГТУ*, 2023, № 1, с. 120–130, doi: <https://doi.org/10.36622/VSTU.2023.19.1.018>
- [11] Родионов И.В. Анализ структуры поверхностного слоя, его качества и влияния на эксплуатационные свойства деталей. *Современные материалы, техника и технологии*, 2020, № 3, с. 42–47.
- [12] Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Лебеденко В.Г. Повышение качества поверхностного слоя деталей при обработке поверхностным пластическим деформированием в гибких гранулированных средах. *Вестник ДГТУ*, 2009, т. 9, № 3, с. 213–224.
- [13] Паршин С.В. *Конечно-элементное моделирование в решении прочностных задач машиностроения*. Екатеринбург, ИНМТ УрФУ, 2024. 68 с.
- [14] Жидков А.В. *Применение системы ANSYS к решению задач геометрического и конечно-элементного моделирования*. Нижний Новгород, ННГУ, 2006. 115 с.
- [15] Тимошенко С.П. *Сопротивление материалов*. Т. 1, 2. Москва, Наука, 1965. 364 с., 480 с.
- [16] Кожаринова Л.В. *Основы теории упругости и пластичности*. Москва, Изд-во АСВ, 2010. 136 с.
- [17] Новожилов В.В. *Теория упругости*. Санкт-Петербург, Политехника, 2012. 409 с.
- [18] Бобровский Н.М. *Технология обработки деталей поверхностно-пластическим деформированием без применения смазывающе-охлаждающих технологических средств*. Самара, СамНЦ РАН, 2012. 142 с.

## References

- [1] Vityaz P.A., Panin V.E., Belyy A.B. et al. Mechanics of plastic deformation and fracture of surface hardened solids under friction conditions. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2002, vol. 5, no. 1, pp. 15–28. (In Russ.).
- [2] Aliev A.A., Bulgakov V.P., Prikhodko B.S. Surface quality and properties of machine parts. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik of Astrakhan State Technical University], 2004, no. 1, pp. 8–12. (In Russ.).
- [3] Smelyanskiy V.M. *Mekhanika uprochneniya detaley poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem* [Mechanics of hardening of parts by surface plastic deformation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2002. 299 p. (In Russ.).
- [4] Makarov P.V., Eremin M.O. Fracture model of brittle and quasibrittle materials and geome-dia. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2013, vol. 16, no. 1, pp. 5–26. (In Russ.). (Eng. version: *Phys. Mesomech.*, 2013, vol. 16, no. 3, pp. 207–226, doi: <https://doi.org/10.1134/S1029959913030041>)
- [5] Kwon Y.W. Revisiting failure of brittle materials. *J. Pressure Vessel Technol.*, 2021, vol. 143, no. 6, art. 064503, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4050989>
- [6] Deryugin E.E. Crack model with plastic strain gradients. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2022, vol. 25, no. 1, pp. 43–65, doi: [https://doi.org/10.55652/1683-805X\\_2022\\_25\\_1\\_43](https://doi.org/10.55652/1683-805X_2022_25_1_43) (in Russ.). (Eng. version: *Phys. Mesomech.*, 2022, vol. 25, no. 3, pp. 227–247, doi: <https://doi.org/10.1134/S1029959922030043>)
- [7] Brach S., Tanné E., Bourdin B. et al. Phase-field study of crack nucleation and propagation in elastic-perfectly plastic bodies. *CMAME*, 2019, vol. 353, pp. 44–65, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2019.04.027>
- [8] Makeev D.N. Influence of alloying elements on the steel properties. *Vestnik SGTU* [Vestnik Saratov State Technical University], 2012, no. 1, pp. 92–98. (In Russ.).

- [9] Dorofeev Yu.G., Mikhaylenko S.S., Babets A.V. et al. Effect of chemical heat treatment on structure and properties of low-alloyed powder steels. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Technical Sciences], 2004, no. S5, pp. 37–40. (In Russ.).
- [10] Zaydes S.A., Nguen Kh.Kh. Influence of parameters of reversible surface plastic deformation on the hardened parts roughness. *Vestnik VGTU* [Bulletin of Voronezh State Technical University], 2023, no. 1, pp. 120–130, doi: <https://doi.org/10.36622/VSTU.2023.19.1.018> (in Russ.).
- [11] Rodionov I.V. Analysis of the structure of the surface layer, its quality and influence on the performance properties of parts. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii*, 2020, no. 3, pp. 42–47. (In Russ.).
- [12] Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Lebedenko V.G. Improvement of quality of the blanket of details at processing by superficial plastic deformation in the flexible granulated environments. *Vestnik DGTU* [Vestnik of Don State Technical University], 2009, vol. 9, no. 3, pp. 213–224. (In Russ.).
- [13] Parshin S.V. *Konechno-elementnoe modelirovanie v reshenii prochnostnykh zadach mashinostroeniya* [Finite element modeling in solving strength problems of mechanical engineering]. Ekaterinburg, INMT UrFU Publ., 2024. 68 p. (In Russ.).
- [14] Zhidkov A.V. *Primenenie sistemy ANSYS k resheniyu zadach geometricheskogo i konechno-elementnogo modelirovaniya* [Application of ANSYS system to the solution of geometrical and finite element modeling problems]. Nizhniy Novgorod, NNGU Publ., 2006. 115 p. (In Russ.).
- [15] Timoshenko S. *Strength of materials*. Vol. 1, 2. Krieger, 1976. 456 p. (Russ. ed.: *Soprotivlenie materialov*. T. 1, 2. Moscow, Nauka Publ., 1965. 364 p., 480 p.)
- [16] Kozharinova L.V. *Osnovy teorii uprugosti i plastichnosti* [Fundamentals of the theory of elasticity and plasticity]. Moscow, Izd-vo ASV Publ., 2010. 136 p. (In Russ.).
- [17] Novozhilov V.V. *Teoriya uprugosti* [Theory of elasticity]. Sankt-Peterburg, Politehnika Publ., 2012. 409 p. (In Russ.).
- [18] Bobrovskiy N.M. *Tekhnologiya obrabotki detaley poverkhnostno-plasticheskim deformirovaniem bez primeneniya smazyvayushche-okhlazhdayushchikh tekhnologicheskikh sredstv* [Technology of processing of details by surface-plastic deformation without application of lubricating-cooling technological means]. Samara, SamNTs RAN Publ., 2012. 142 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 14.03.2025

## Информация об авторах

**ЗАЙДЕС Семен Азикович** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры материаловедения, сварочных и аддитивных технологий. ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83, e-mail: [zsa@istu.edu](mailto:zsa@istu.edu)).

**ЛЕ Тхань Тьунг** — аспирант кафедры материаловедения, сварочных и аддитивных технологий. ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83, e-mail: [lechung275@gmail.com](mailto:lechung275@gmail.com)).

## Information about the authors

**ZAIDES Semen Azikovich** — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Materials Science, Welding and Additive Technologies. Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontova St., Bldg. 83, e-mail: [zsa@istu.edu](mailto:zsa@istu.edu)).

**LE Thanh Chung** — Postgraduate, Department of Materials Science, Welding and Additive Technologies. Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontova St., Bldg. 83, e-mail: [lechung275@gmail.com](mailto:lechung275@gmail.com)).

### Просьба сослаться на эту статью следующим образом:

Зайдес С.А., Ле Тхань Тьунг. Оценка влияния направления упрочненных армированных волокон на деформирующую способность цилиндрических деталей. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 9, с. 41–52.

### Please cite this article in English as:

Zaides S.A., Le Thanh Chung. Assessment of the reinforced fiber direction influence on deformability of the cylindrical parts. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 9, pp. 41–52.