
НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ

МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 62-462.3;677.076

**О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ
В ГИБКИХ РУКАВАХ КРОССХЕЛИКАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ**© 2020 г. А. В. Березин¹, В. Ю. Жиркевич^{1,*}¹*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия***e-mail: basiliuss@gmail.com*

Поступила в редакцию 02.04.2019 г.

Принята к публикации 29.05.2020 г.

Проведены исследования прочностных свойств гибкого рукава, выполненного из карбида титана и имеющего ранее не применявшееся в технике переплетение нитей. В ходе моделирования, проведенного с использованием метода конечных элементов, показано, что рукава предлагаемой конструкции способны выдерживать давление, делающее оправданным их применение в промышленности. При этом они способны демонстрировать достаточно высокую гибкость, нетипичную в традиционном контексте обсуждения механических свойств технических керамик. Это открывает новые возможности использования керамики в науке и технике.

Ключевые слова: переплетение нитей, гибкие рукава, техническая керамика, жаропрочность, износостойкость, конечноэлементный анализ

DOI: 10.31857/S0235711920050041

В статье предложен принципиально новый класс тканей, имеющих ранее не применявшееся переплетение нитей [1]. Нити основы в нем изготовлены в виде винтовых спиралей (пружинок), которые перевиваются с нитями утка — такими же пружинками, но закрученными в противоположном направлении, из-за чего ткань предложенной структуры получила название кроссхеликальной. Такая ткань отличается максимально возможной для ткани связностью, поскольку на каждом витке каждая нить основы охватывает не только соответствующие нити утка, но и смежные нити самой основы. Высокая связность обуславливает значительную живучесть ткани ввиду того, что развитие любого локального повреждения сдерживается перераспределением нагрузок между всеми примыкающими к нему нитями.

Предложенная конструкция может найти много полезных применений, одним из которых может являться производство бесшовных гибких труб (рукавов). Т.к. длинные тонкие пружины чрезвычайно плохо сопротивляются поперечному изгибу, можно предположить, что с их использованием возможно изготовление гибких рукавов из достаточно хрупких материалов, поскольку значительные поперечные перемещения концов каждой пружинки будут сопровождаться относительно небольшими деформациями в ее материале. На рис. 1 показан фрагмент рукава описанной конструкции. Было бы заманчиво изготовить такое изделие из жаропрочной технической керамики, что дало бы возможность использовать рукава такого рода для транспортировки различных расплавов, включая расплавы металлов, либо горячих газов. Предполагается, что для обеспечения герметичности поры такой конструкции заполнены столь же жаропрочным волокнистым материалом.

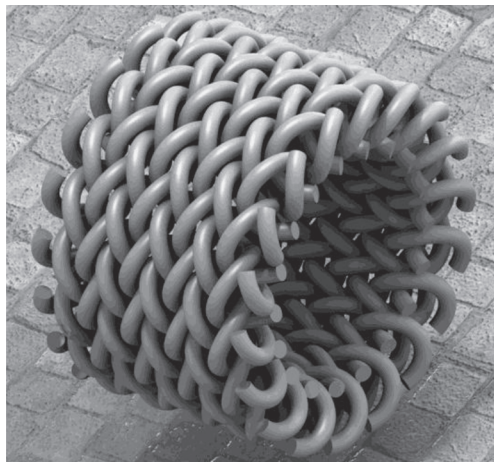


Рис. 1. Рукав из кроссхеликальной ткани.

Обоснование подходов и результаты моделирования. Исследование, которому посвящена настоящая статья, имело своей целью проверку средствами конечноэлементного моделирования предположения о допустимости применения технической керамики для использования в гибких рукавах описанной конструкции. Проверка осуществлялась на примере карбида титана, механические характеристики которого достаточно давно известны [2–4]. Несмотря на то, что прочность при растяжении этого материала, как и других технических керамик, сильно разнится в зависимости от пористости, размера зерна, технологии получения, применяемых добавок и способов термообработки, в целом из имеющейся литературы следует, что для качественных образцов горячепрессованного карбида титана она составляет около 500 МПа, причем это значение сохраняется до температур около 1000°C, после чего быстро падает. Поэтому для расчета принимались механические характеристики карбида титана, соответствующие именно этой температуре.

В недеформированном состоянии рукав кроссхеликальной структуры представляет собой переплетение двух семейств искривленных винтовых пружин (рис. 1), в которых оси соответствующих винтов образуют на цилиндрической срединной поверхности формируемого рукава ортогональную сеть, базисные векторы которой ориентированы под 45° к оси этой цилиндрической поверхности. Таким образом, получается предфрактал, т.е., самоподобная фигура, в которой базовые винтовые образования, в свою очередь, закручиваются по винтовым линиям большего диаметра.

На рис. 2 показана коаксиальная к упомянутой срединной поверхности цилиндрическая поверхность, ограничивающая рукав снаружи, наряду с тороидальной поверхностью, в которую она переходит при изгибе рукава.

Геометрия рукава рассматриваемой структуры характеризуется четырьмя параметрами: диаметром нити или прутка, из которого сформированы винтовые пружины d_1 , диаметром соответствующего базового винта d_2 , диаметром упомянутой срединной цилиндрической поверхности d_3 и общим числом пружин k в основании цилиндра срединной поверхности, которые, в конечном счете, образуют замкнутую поверхность рукава. Параметр k всегда четный, поскольку включает в себя одинаковое количество пружин, закрученных в одну и другую сторону. Если вернуться к аналогии с традиционной тканью, то произвольный малый фрагмент кроссхеликального рукава подобен полотну, сориентированному на срединной поверхности так, что нити основы и утка

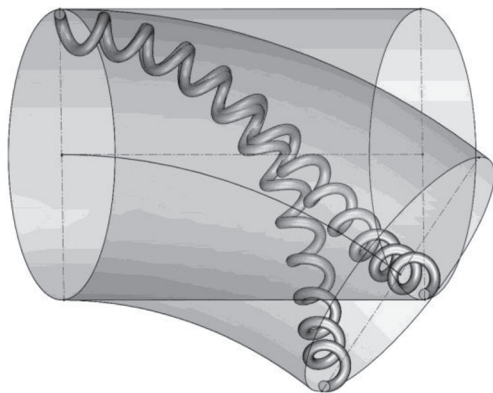


Рис. 2. Схема изгиба рукава с образующими его винтовыми нитями.

направлены под 45° градусов к оси рукава по разные стороны от нее. Обвивая срединную поверхность по винтовой кривой, эти нити сколь угодно долго циклично воспроизводят исходную геометрию. Только так возможно получить бесшовный длинный рукав.

Поскольку размерность диаметров d_1 , d_2 , d_3 одинакова, удобно ввести безразмерные диаметры $\delta_1 = d_1/d_3$ и $\delta_2 = d_2/d_3$. Любопытно, что для каждого k существует единственное сочетание δ_1 и δ_2 , соответствующее максимально возможной плотности структуры. Эти значения определены в результате 3D-моделирования и приведены в табл. 1, где через ϕ обозначена пористость получаемого тела рукава, ограниченного огибающими его внутренней и наружной цилиндрическими поверхностями.

Видно, что для рукава из 24 пружинok она составляет около половины общего объема структуры и уменьшается с увеличением k . При фиксированном диаметре рукава максимально возможной плотности, его толщина и диаметр прутков, используемых для изготовления пружинok, уменьшаются почти обратно пропорционально значению k . На рис. 3 показана ячейка периодичности рукава максимальной плотности.

Для конечноэлементного анализа был выбран рукав максимальной плотности с параметрами: $k = 24$, $d_1 = 1.6$ мм, $d_2 = 5.2$ мм, $d_3 = 36$ мм. В ходе исследования в первую очередь определялась величина максимально допустимого давления заполняющей рукав среды, которое способна выдержать конструкция по условиям прочности. Поскольку исследуемая геометрия сама по себе достаточно сложна, при деформировании образует множественные заранее не определенные контакты, а свойства заполняющего поры волокнистого материала трудно формализуемы. Расчет проводился в предположении, что в ходе перераспределения нагрузки от внутреннего давления между всеми элементами конструкции, в конечном счете, получится достаточно однородная картина, близкая к случаю нагружения модели радиально ориентированными

Таблица 1. Параметры рукава максимальной плотности

k	δ_1	δ_2	ϕ
24	0.0448	0.1440	0.496
36	0.0306	0.0978	0.477
48	0.0232	0.0740	0.467
60	0.0188	0.0598	0.457

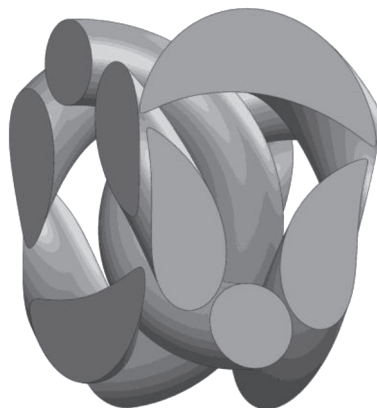


Рис. 3. Пространственная ячейка периодичности структуры рукава.

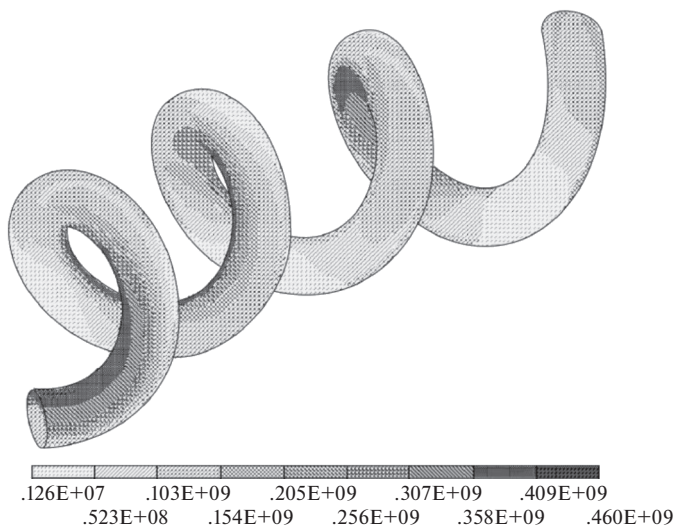


Рис. 4. Напряжения растяжения от действия внутреннего давления.

объемными силами. Т.к. в этом случае все пружинки оказываются в одинаковых условиях нагружения, достаточно рассмотреть фрагмент любой из них, взятой отдельно от массива, при условии задания соответствующих условий периодичности на концах выбранного фрагмента.

Ввиду того, что прочность керамики на растяжение значительно ниже прочности на сжатие, в ходе решения контролировалась величина возникающих в конструкции максимальных растягивающих напряжений. Радиальная объемная нагрузка увеличивалась до тех пор, пока эти напряжения не достигли предела прочности при растяжении. Состояние, соответствующее этому моменту, показано на рис. 4, где градуировка цветовой шкалы показывает первые главные напряжения в Па, и соответствует давлению среды в рукаве в 6.5 атм.

Для изучения изгибной податливости конструкции взят фрагмент пружины длиной в половину шага винта вокруг срединной цилиндрической поверхности рукава. При

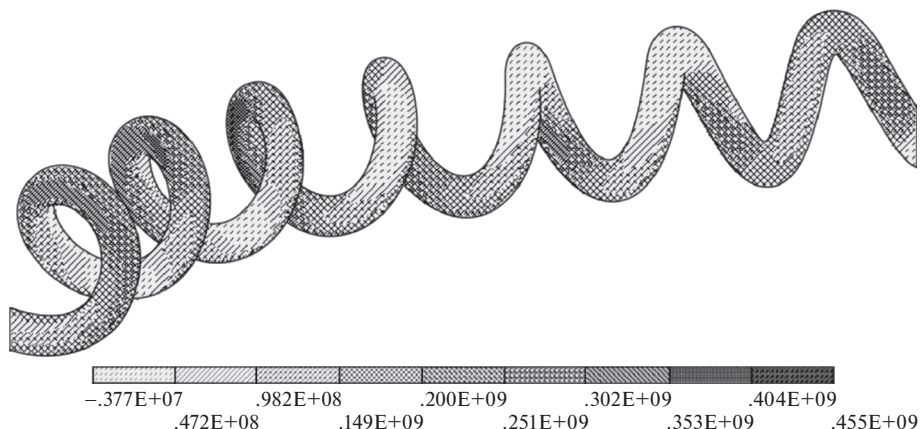


Рис. 5. Напряжения растяжения, возникающие при изгибе рукава.

изгибе рукава в плоскости, проходящей через концы такого фрагмента, он оказывается достаточным для исследования, т.к. исчерпывает весь спектр нагрузок, возникающих для произвольной пружины во время такого изгиба, ибо содержит как участки, подвергающиеся максимальному растяжению, так и участки максимального сжатия, равно как и все промежуточные. На рис. 2 этот фрагмент показан как в исходном положении, соответствующем недеформированному рукаву, так и в положении, когда при изгибе рукава его наружная поверхность, охватывающая данный фрагмент, переходит в тороидальную, которая соответствует изогнутому состоянию. Вопросы возможной потери устойчивости в рамках данного исследования не рассматривались. Нагружение осуществлялось кинематически, путем принудительного перевода исследуемого фрагмента пружины из исходной недеформированной геометрии в геометрию, соответствующую изображенному на рис. 2 изгибу рукава, после чего анализировалось возникшее при этом напряженное состояние. Такое моделирование должно осуществляться в постановке задачи больших перемещений (рис. 5).

В ходе расчетов выявлено, что растягивающие напряжения, приближающиеся к пределу прочности на растяжение, возникают в конструкции при изгибе оси рукава по радиусу 90 мм, т.е. радиусу, равному всего 2.5 диаметра срединной поверхности рукава. Такой показатель можно оценить как свидетельство достаточной для практического применения гибкости рукава предложенной конструкции. Учитывая, что речь идет о применении жаропрочного, но очень хрупкого материала, этот результат следует считать интересным.

Однако использование геометрии максимальной плотности имеет свои минусы. Осевые линии используемых в конструкции рукава пружин образуют на срединной цилиндрической поверхности рукава ортогональную сеть. При изгибе рукава эта сеть перестает быть ортогональной и превращается в ромбическую, со стороны растянутой части — с ромбами, вытянутыми вдоль направления растяжения волокон, а со стороны сжатой — сплюснутыми в этом направлении. Поскольку в рукаве максимальной плотности смыкание смежных витков изначально имеет место, эта сплюснутость не может быть реализована, и возможны значительные возрастания напряжений растяжения из-за смещения нейтральной оси непосредственно в область сжимаемой поверхности рукава, либо потеря устойчивости того или иного вида. Из этого следует, что необходимо уменьшить диаметр d_1 для обеспечения зазоров между витками, достаточных для смыкания витков на сжимаемой стороне рукава во время изгиба.

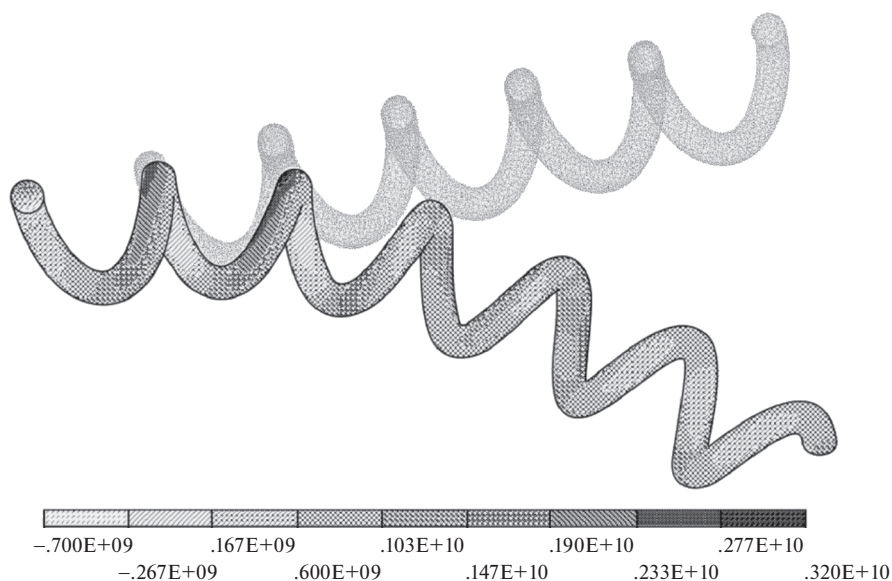


Рис. 6. Напряжения растяжения при формировании рукава.

В частности, как обнаружено в ходе 3D-моделирования на рассматриваемом примере, это уменьшение при радиусе изгиба 90 мм должно составлять почти треть, что достаточно много, но при радиусе 180 мм — уже около 15%, что можно считать приемлемой величиной. Если ранее радиус изгиба в $2.5d_3$ был оценен как допустимый по условию прочности, то вдвое больший, то есть $5d_3$, тем более окажется позволительным. К тому же уменьшение диаметра прутка до $0.85d_1$ вызовет увеличение податливости пружины, что при кинематическом нагружении приведет к снижению возникающих в ней напряжений.

Подобно процедуре определения напряжений в пружинах изогнутого рукава решалась задача определения напряжений в них в процессе изначальной сборки прямого рукава из прямолинейных винтовых пружин. Как и ранее, нагружение осуществлялось путем принудительного перевода пружины из исходной прямолинейной геометрии в геометрию, соответствующую ее положению в теле не искривленного рукава. Соответствующий результат показан на рис. 6, где исходная форма пружины изображена полупрозрачной. В отличие от случая изгиба рукава напряжения, возникающие в этом варианте, явно превышают прочность материала. Из этого следует вывод, что изготовление такого рода рукавов путем сборки из предварительно изготовленных прямолинейных пружин, ввинчиваемых в процессе сборки в соответствующие позиции, вряд ли возможно. Технология изготовления должна предполагать получение всего рукава целиком непосредственно на этапе формовки, до процедуры горячего прессования.

Полученные на примере карбида титана результаты можно распространить и на другие виды хрупких жаропрочных материалов. В соответствии с [5] прочность при растяжении поликристаллического карбида вольфрама существенно зависит от среднего размера зерна, но при значении этого параметра 0.7 мкм примерно сопоставима с прочностью, принимавшейся здесь для карбида титана. Это значит, что рукава из карбида вольфрама будут обладать такой же способностью переносить внутреннее давле-

ние. Вместе с тем, допустимый радиус изгиба для них будет больше ввиду большего модуля упругости.

Изготовление гибких рукавов можно осуществлять путем предварительного размещения спекаемой смеси в плавких тонких трубках требуемой конфигурации для предварительного уплотнения под давлением при невысоких температурах, как это делается для карбида бора в [6], с последующим спеканием. В перспективе возможно применение аддитивных технологий [7]. Можно ожидать, что при этом наиболее заманчивым окажется применение диборидов металлов [8], отличающихся жаропрочностью и высокими прочностными свойствами.

Выводы. Таким образом, возможно получение гибких рукавов из жаропрочной керамики. Такие рукава могут выдерживать значительное внутренне давление и не разрушаться при изгибах по радиусу, впятеро превышающему средний диаметр рукава. Изготовление таких изделий возможно при условии получения рукава необходимой структуры непосредственно на этапе формовки, до процедуры горячего прессования. Такие рукава можно использовать, например, при перекачке различных расплавов, высокоабразивных материалов, управлении направлением горячих газовых потоков и при других нестандартных применениях.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Березин А.В., Жиркевич В.Ю. Ткань и способ ее получения. РФ Патент 2243299, 2004.
2. Самсонов Г.В., Унадхия Г.Ш., Нейшпор В.С. Физическое материаловедение карбидов. Киев: Наукова думка. 1974. 455 с.
3. Кипарисов С.С., Левинский Ю.В., Петров А.П. Карбид титана: получение, свойства, применение. М.: Металлургия, 1987. 216 с.
4. Шевченко В.Я. Введение в техническую керамику. М.: Наука. 1993. 112 с.
5. Головчан В.Т., Бондаренко В.П., Литошенко Н.В. О прочности поликристаллического монокарбида вольфрама при растяжении // Проблемы прочности. 2003. № 4. С. 82.
6. Liu L., Li X., He Q., Xu L., Cao X., Peng X., Meng C., Wang W., Zhu W., Wang Y. Sintering dense boron carbide without grain growth under high pressure // Journal of the American Ceramic Society. 2018. V. 101. № 3. P. 1289.
7. Chen A.N., Wu J.M., Chen J.Y., Xiao H., Chen P., Li C.H., Shi Y.S., Liu K. High-performance ceramic parts with complex shape prepared by selective laser sintering: a review // Advances in Applied Ceramics. Institute of Materials. 2018. V. 117. № 2. P. 100.
8. Zhang G.-J., Liu J.-X., Ni D.-W., Zou J., Liu H.-T., Wu W.-W., Suzuki T.S., Sakka Y. Inherent anisotropy in transition metal diborides and microstructure/property tailoring in ultra-high temperature ceramics-A review // Journal of the European Ceramic Society. 2018. V. 38. № 2. P. 371.