

УДК: 539.4

Численное исследование упругих и прочностных характеристик материалов с покрытиями, полученных электроискровым легированием

В. Д. Власенко^{1,а}, А. Д. Верхотуров²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Вычислительный центр Дальневосточного отделения Российской академии наук,
Россия, 680000, г. Хабаровск, ул. Ким-Ю-Чена, д. 65

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт водных и экологических проблем Дальневосточного отделения Российской академии наук,
Россия, 680000, г. Хабаровск, ул. Ким-Ю-Чена, д. 65

E-mail: ^а centik1960@yandex.ru

Получено 17 июня 2014 г.

В работе численно исследовано влияние упругих и прочностных характеристик твердосплавных материалов с покрытиями из тугоплавких соединений, полученных электроискровым легированием, при воздействии температурных и силовых факторов при помощи метода конечных элементов.

Ключевые слова: модель, напряженное состояние, материал, покрытие, упругие и прочностные характеристики, метод конечных элементов

Numerical research elastic and strength characteristics of materials with coverings, received by an electrospark alloying

V. D. Vlasenko¹, A. D. Verhoturov²

¹ Computing Center, FEB RAS, 65 Kim-Yu-Chen Str., Khabarovsk, 680000, Russia

² Institute of Water and Ecology Problems, FEB RAS, 65 Kim-Yu-Chen Str., Khabarovsk, 680000, Russia

Abstract. — In the work is numerically investigated the influence of elastic and strength characteristics of hard materials with coatings of refractory compounds, received electric-spark doping, at influence of temperature and power factors using the finite element method.

Keywords: model, stress state, material, coating, elastic and strength characteristics, method of final elements

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2014, vol. 6, no. 5, pp. 671–678 (Russian).

Введение

Стратегическим направлением развития материаловедения является разработка новых материалов, что связано со все возрастающими требованиями к повышению уровня их физико-химических, технологических и эксплуатационных свойств, создание технологий получения и производства. В этом аспекте особый научный и практический интерес представляют разработка и получение инструментальных материалов. Известно, что в машиностроении и других отраслях промышленности производительность труда и качество обработки деталей машин в значительной степени зависят от применяемого режущего материала. В связи с появлением новых конструкционных материалов, а также необходимостью повышения стойкости твердых сплавов остро стоит проблема увеличения режущих инструментов, обладающих повышенной работоспособностью, надежностью и прочностью.

В настоящее время для увеличения ресурсов работы инструмента широко используют материалы с различными защитными покрытиями, так называемые материалы с поверхностным градиентом свойств (МПГС). В науке и технике в настоящее время известны многочисленные методы поверхностного упрочнения металлических поверхностей. Среди этих методов особый интерес для повышения работоспособности режущего инструмента, особенно в мелкосерийном и индивидуальном производстве, представляет метод электроискрового легирования (ЭИЛ). Однако несмотря на то, что ЭИЛ положительно влияет на износостойкость поверхностного слоя, его недостатки нередко ограничивают применение этого метода для широкого круга деталей и материалов. К таким недостаткам относится образование трещин, сколов за счет образования растягивающих напряжений, образующихся в процессе формирования легированного слоя. Более того, в процессе ЭИЛ с определенного удельного времени легирования наблюдается, как правило, разрушение поверхностного слоя (уменьшение массы катода), что предъявляет жесткие требования к выбору режимов обработки.

В связи с этим целью работы было численное исследование упругих и прочностных характеристик ЭИЛ покрытий для дальнейшей оптимизации технологии их формирования.

Постановка задачи

Прочность материала является важной характеристикой, определяющей способность материала сопротивляться микро- и макроразрушению. Однако особенности разрушения материалов с покрытиями требуют создания специальных моделей композитов, основанных на изучении упругих и прочностных характеристик материалов с покрытиями при помощи моделирования на компьютерах, в том числе с применением высокопроизводительных вычислительных систем.

Механическая прочность материала с поверхностным градиентом свойств определяется многими параметрами. Например, она зависит от толщины покрытия или эффективного слоя, градиента физико-механических свойств, значений силовых и температурных факторов. В общем виде модели напряженного состояния МПГС можно представить в виде

$$\sigma = f(P, T, t_i, \text{grad} E, \text{grad} \alpha),$$

где P — нагрузка, действующая на материал; T — температура; t_i — толщина слоев покрытия или эффективного слоя; $\text{grad} E$ — поверхностный градиент упругих характеристик; $\text{grad} \alpha$ — поверхностный градиент термоупругих характеристик.

Важнейшими исходными данными при исследовании прочности композиций являются упругие характеристики (модули упругости, коэффициент Пуассона и т. д.) его структурных компонентов. В соответствии с принятой моделью для исследования прочности МПГС была принята следующая модель исследования напряженного состояния [Фадеев и др., 2002; Емельянов, 2000], которая рассмотрена ниже.

Выбрана прямоугольная система координат так, что начало координат лежит в точке приложения нагрузки, ось x направлена от поверхности в глубь объема материала, а ось y — вдоль поверхности рассматриваемой области перпендикулярно оси x . Ось x совпадает с направлением толщины материала. $-a \leq y \leq a$ — зона контакта (рис. 1).

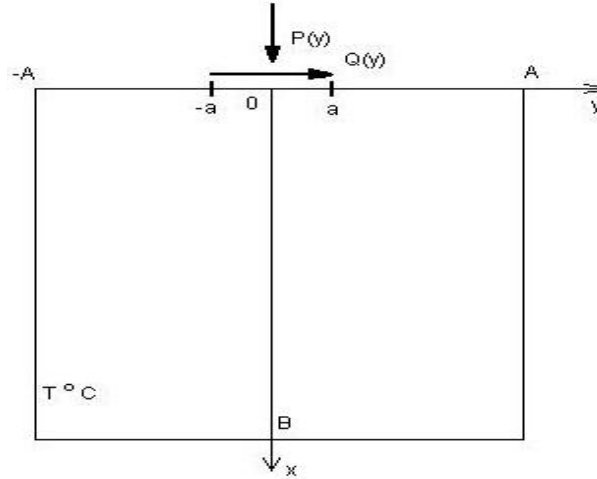


Рис. 1. Расчетная схема

Так как размеры деталей достаточно велики по сравнению с размерами зоны контакта, то напряжения в этой зоне слабо зависят от конфигураций самих деталей вдали от точного способа закрепления и опирания деталей [Остафьев, 1979; Джонсон, 1989]. Поэтому допускаем, что исследуемая область имеет ограниченные размеры: $0 \leq x \leq B$, $-A \leq y \leq A$ ($2A, B \approx 10 \div 20$).

МППС инструментального назначения работают в условиях трения и сжатия. Поэтому определяющими в зоне контакта рассматриваемого материала будут сжимающие $P(y)$ и сдвиговые $Q(y)$ нагрузки. Так как в случае возникновения в поверхностных слоях растягивающих напряжений происходит изменение механических свойств материалов с покрытиями, а твердые сплавы в основе имеют низкую прочность на растяжение, то в расчетах величины $P(y)$, $Q(y)$ были приняты равными 30 и 70 % от предела прочности материала основы на растяжение и сдвиг соответственно. Так как в процессе эксплуатации в материале возникают температурные поля, вследствие чего образуются термонапряжения, то считали, что исследуемая область равномерно нагрета до температур 100 °C и 400 °C.

Задача решается в плоской постановке теории упругости. Компоненты тензора напряжений $\sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{zx} = 0$. Компоненты тензора деформаций $\gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0$. Тогда тензор напряжений

будет в виде $\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} \end{bmatrix}$, компоненты которого удовлетворяют статическим дифференциальным уравнениям равновесия:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0, \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} = 0. \end{cases}$$

Компоненты тензора деформаций ε_{ij} и вектора перемещения u_{ij} связаны формулами Коши, и компоненты деформации должны удовлетворять уравнению совместности.

Связь компонентов деформаций ε_{ik} с компонентами напряжений u_{ij} описывается физическими уравнениями — законом Гука [Александров. Потапов, 1990]. Так как у поверхностно

упрочненных материалов и материалов с покрытиями присутствует градиент упругих свойств, то закон Гука запишется в виде

$$\varepsilon_{ik} = \frac{1}{2G(x)} \left[\sigma_{ik} - \frac{\nu(x)}{1+\nu(x)} S \cdot \delta_{ik} \right], \quad i, k = 1, 2,$$

где $S = \sigma_x + \sigma_y$; E — модуль Юнга; ν — коэффициент Пуассона;

$$2G(x) = \frac{E(x)}{1+\nu(x)}; \quad \delta_{ik} = \begin{cases} 1, & i = k, \\ 0, & i \neq k. \end{cases}$$

На границах были заданы смешанные условия:

при $x = 0, -a \leq y \leq a$ (зона контакта): $\sigma = P(y), \tau = Q(y)$;

при $x = 0, -A \leq y \leq -a, a \leq y \leq A$ (свободная поверхность): $\sigma = \tau = 0$;

при $x = B, -A \leq y \leq A$: $u_x = 0, \tau_x = 0$; при $0 \leq x \leq B, y = -A$; A : $u_y = 0, \tau_y = 0$.

Последние два граничных условия — это так называемые условия скольжения вдоль жесткой стенки.

Алгоритм расчета напряженного состояния и исследования прочности

В связи с тем, что толщина покрытий намного меньше размеров исследуемой области, то расчет напряженного состояния проводился в два этапа [Партон, 1990; Сиратори и др., 1986]. На первом этапе проводился расчет напряженного состояния на макроуровне, материал области считался изотропным (рис. 1). На втором этапе, после выявления области с высоким уровнем напряжений у поверхности, рассчитывается напряженное состояние на мезоуровне. На данном этапе исследуемый материал считался изотропным вдоль оси y и гетерогенным вдоль оси x , но при этом материал слоя сохраняет эффективные характеристики реальных материалов. В качестве граничных условий используются напряжения, полученные на предыдущем этапе.

На каждом направлении рассматривались материалы с различными покрытиями и оценивалась их прочность. Численно задача расчета напряженного состояния решалась с помощью метода конечных элементов (МКЭ). В основу этого метода положено расчленение исследуемой области на отдельные элементы простой формы (прямоугольной и треугольной). Сочленение элементов осуществляется в узлах, в которых полностью удовлетворяются условия равновесия и неразрывности перемещений. МКЭ эффективен при исследовании градиентных материалов благодаря тому, что любой конечный элемент может иметь свои упругие характеристики. Далее, при построении напряженного состояния, оценивалась прочность материала основы по критерию Лебедева–Писаренко [Остафьев, 1979], а материала покрытия — по критерию наибольших касательных напряжений [Бэкоффен, 1977]. Если в одном из материалов величина напряжений превысит критическое напряжение, то материал будет разрушаться.

Анализ и результаты

Для выбранной схемы нагружения определяющим параметром напряженного состояния является компонента тензора напряжений. Рассматривались следующие композиции: в качестве материала основы выступают твердые сплавы ВК6, в качестве материала покрытия — тугоплавкие соединения (TiC, TiN). На рисунке 2 показаны напряжения в поверхностном слое от поверхности вглубь сплава ВК6. Видно, что на поверхности покрытия наблюдаются высокие растягивающие напряжения, которые плавно уменьшаются до границы раздела. Зависимость выражается пилообразной кривой, при этом максимальное напряжение наблюдается на поверхности покрытия и на границе раздела «покрытие–основа», что может способствовать откалыванию покрытий.

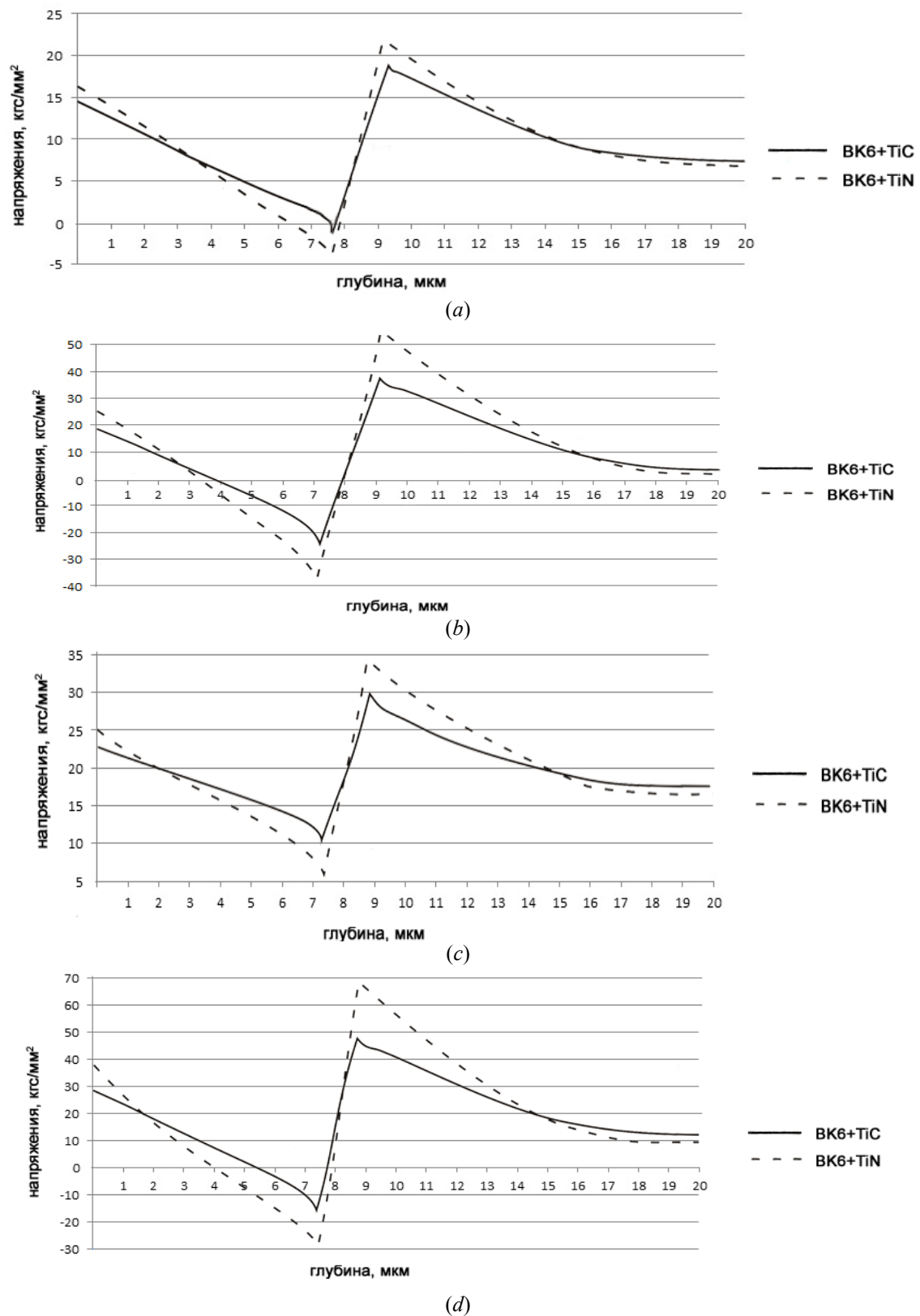


Рис. 2. Распределение напряжений σ , в материале с многослойным покрытием от поверхности в глубь объема материала: (a) при $P, Q = 30\%$ и $T = 100\text{ }^\circ\text{C}$; (b) при $P, Q = 30\%$ и $T = 400\text{ }^\circ\text{C}$; (c) при $P, Q = 70\%$ и $T = 100\text{ }^\circ\text{C}$; (d) при $P, Q = 70\%$ и $T = 400\text{ }^\circ\text{C}$

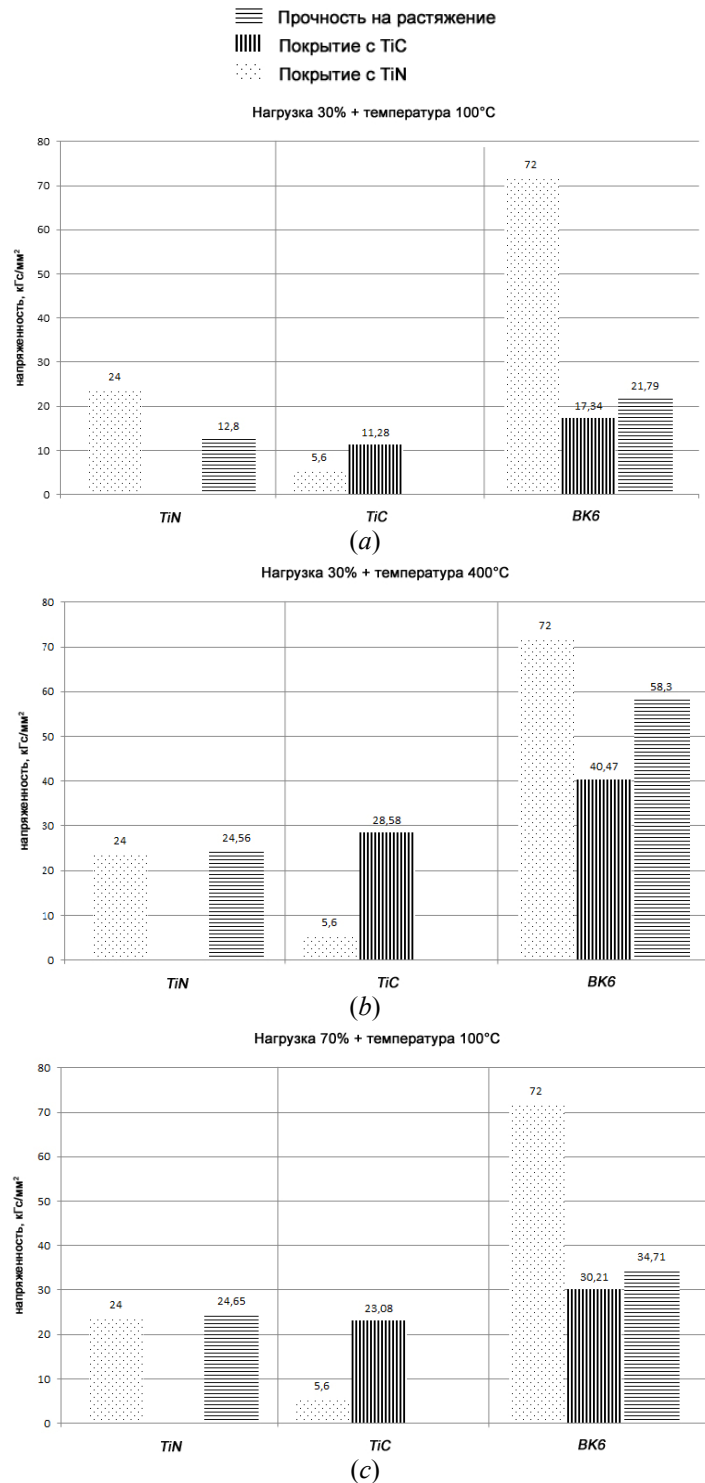


Рис. 3. Сравнительные диаграммы рабочих напряжений σ_y и допустимых на растяжение напряжений материалов с покрытиями BK6 + TiC, BK6 + TiN при различных комбинациях силовых и температурных факторов: (a) при $P, Q = 30\%$ и $T = 100^\circ\text{C}$; (b) при $P, Q = 30\%$ и $T = 400^\circ\text{C}$, (c) при $P, Q = 70\%$ и $T = 100^\circ\text{C}$; (d) при $P, Q = 70\%$ и $T = 400^\circ\text{C}$

При воздействии комбинации силовых и температурных нагрузок получили, что максимальные растягивающие напряжения в каждом слое любого покрытия возникают в основном со стороны поверхности материала. С увеличением силовых нагрузок уровень рабочих напряжений σ_y

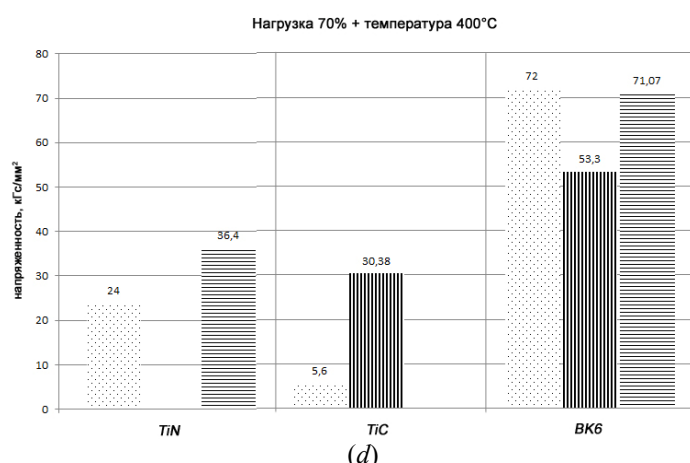


Рис. 3 (продолжение)

у поверхности материала с монопокрытием смещается в область растягивающих напряжений, тогда как с увеличением температуры происходит смещение кривой к области сжимающих напряжений. Из рисунка 2 также видно, что в объеме подложки, прилегающем к покрытию, возникает высокий уровень напряжений, что может сказаться негативно на работоспособности материала основы при высоких условиях нагружения.

Исследование прочности показало, что практически все материалы при высоких значениях нагрузки и температуры практически разрушаются (рис. 3). Это связано с тем, что у материалов покрытий (тугоплавкие соединения) прочность на растяжение в несколько раз меньше прочности на растяжение твердых сплавов ($[\sigma^{\text{очн}}] \approx 3 \dots 21 [\sigma^{\text{покр}}]$, см., например, [Самсонов, Винницкий, 1976]). Поэтому уже при достижении или нагрузки 30 % от $[\sigma^{\text{очн}}]$ или температуры 100°C покрытие будет разрушаться первым. А затем, в зависимости от адгезионной прочности соединения с основой разрушения, может перейти либо в основу, либо по границе раздела.

Заключение

Исследование прочности показало, что практически во всех случаях первым разрушается материал покрытия. Исследованы упругие характеристики материалов, применяющихся для покрытия инструментов. Установлено, что распределение напряжений в материалах зависит от градиентов упругих и термоупругих характеристик, толщины слоев градиента и условий нагружения.

Список литературы

- Александров А. В., Потапов В. Д. Основы теории упругости и пластичности. — М.: Высшая школа, 1990. — 400 с.
- Бэкоффен В. Процессы деформации. — М.: Металлургия, 1977. — 288 с.
- Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. — М.: Мир, 1989. — 510 с.
- Емельянов Е. Н. К расчету прочности МПГС триботехнического и инструментального назначения // VII конференция «Механика летальных аппаратов и современные материалы». Сб. избранных докладов. — Томск: Изд-во Томского ун-та, 2000. — С. 111–112.
- Остафьев В. А. Расчет динамической прочности режущего инструмента. — М.: Машиностроение, 1979. — 168 с.
- Партон В. З. Механика разрушения: от теории к практике. — М.: Наука, 1990. — 240 с.
- Самсонов Г. В., Винницкий И. М. Тугоплавкие соединения. — М.: Металлургия, 1976. — 560 с.

Сиратори М., Миёси Т., Мацусита Х. Вычислительная механика разрушения. — М.: Мир, 1986. — 334 с.

Фадеев В. С., Емельянов Е. Н., Верхотуров А. Д. Проектирование материалов с поверхностным градиентом свойств инструментального и триботехнического назначения // Междун. симп. (2-ые Самсоновские чтения): Принципы и процессы создания неорганических материалов. Материалы симпозиума. — Хабаровск: РИОТИП, 2002. — С. 163–164.