

ISSN 1991-346X

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ  
ҰЛТТЫҚ ҒЫЛЫМ АКАДЕМИЯСЫНЫҢ

# Х А Б А Р Л А Р Ы

---

---

## ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

## NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES  
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА  
СЕРИЯСЫ**



**СЕРИЯ**

**ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ**



**PHYSICO-MATHEMATICAL  
SERIES**

**1 (299)**

**ҚАҢТАР – АҚПАН 2015 ж.  
ЯНВАРЬ – ФЕВРАЛЬ 2015 г.  
JANUARY – FEBRUARY 2015**

1963 ЖЫЛДЫҢ ҚАҢТАР АЙЫНАН ШЫҒА БАСТАҒАН  
ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1963 ГОДА  
PUBLISHED SINCE JANUARY 1963

ЖЫЛЫНА 6 РЕТ ШЫҒАДЫ  
ВЫХОДИТ 6 РАЗ В ГОД  
PUBLISHED 6 TIMES A YEAR

АЛМАТЫ, ҚР ҰҒА  
АЛМАТЫ, НАН РК  
ALMATY, NAS RK

Б а с р е д а к т о р

ҚР ҰҒА академигі,

**Мұтанов Г. М.**

Р е д а к ц и я а л қ а с ы:

физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Әшімов А.А.**; техн. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Байғұнчекөв Ж.Ж.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Жұмаділдаев А.С.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Қалменов Т.Ш.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Мұқашев Б.Н.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Өтелбаев М.О.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Тәкібаев Н.Ж.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Харин С.Н.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Әбішев М.Е.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Жантаев Ж.Ш.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Қалимолдаев М.Н.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Косов В.Н.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Мұсабаев Т.А.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Ойнаров Р.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Рамазанов Т.С.** (бас редактордың орынбасары); физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Темірбеков Н.М.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Өмірбаев У.У.**

Р е д а к ц и я к ең е с і:

Украинаның ҰҒА академигі **И.Н. Вишневский** (Украина); Украинаның ҰҒА академигі **А.М. Ковалев** (Украина); Беларусь Республикасының ҰҒА академигі **А.А. Михалевич** (Беларусь); Әзірбайжан ҰҒА академигі **А. Пашаев** (Әзірбайжан); Молдова Республикасының ҰҒА академигі **И. Тигиняну** (Молдова); мед. ғ. докторы, проф. **Иозеф Банас** (Польша)

Главный редактор

академик НАН РК

**Г. М. Мутанов**

Редакционная коллегия:

доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **А.А. Ашимов**; доктор техн. наук, проф., академик НАН РК **Ж.Ж. Байгунчеков**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **А.С. Джумадильдаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **Т.Ш. Кальменов**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **Б.Н. Мукашев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **М.О. Отелбаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **Н.Ж. Такибаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **С.Н. Харин**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **М.Е. Абишев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Ж.Ш. Жантаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **М.Н. Калимолдаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **В.Н. Косов**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Т.А. Мусабаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Р. Ойнаров**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Т.С. Рамазанов** (заместитель главного редактора); доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Н.М. Темирбеков**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **У.У. Умирбаев**

Редакционный совет:

академик НАН Украины **И.Н. Вишневский** (Украина); академик НАН Украины **А.М. Ковалев** (Украина); академик НАН Республики Беларусь **А.А. Михалевич** (Беларусь); академик НАН Азербайджанской Республики **А. Пашаев** (Азербайджан); академик НАН Республики Молдова **И. Тигиняну** (Молдова); д. мед. н., проф. **Иозеф Банас** (Польша)

«Известия НАН РК. Серия физико-математическая». ISSN 1991-346X

Собственник: РОО «Национальная академия наук Республики Казахстан» (г. Алматы)

Свидетельство о постановке на учет периодического печатного издания в Комитете информации и архивов Министерства культуры и информации Республики Казахстан №5543-Ж, выданное 01.06.2006 г.

Периодичность: 6 раз в год.

Тираж: 300 экземпляров.

Адрес редакции: 050010, г. Алматы, ул. Шевченко, 28, ком. 219, 220, тел.: 272-13-19, 272-13-18,

[www.nauka-nanrk.kz](http://www.nauka-nanrk.kz) / [physics-mathematics.kz](http://physics-mathematics.kz)

---

© Национальная академия наук Республики Казахстан, 2015

Адрес типографии: ИП «Аруна», г. Алматы, ул. Муратбаева, 75.

Editor in chief

**G. M. Mutanov**,  
academician of NAS RK

Editorial board:

**A.A. Ashimov**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **Zh.Zh. Baigunchekov**, dr. eng. sc., prof., academician of NAS RK; **A.S. Dzhumadildayev**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **T.S. Kalmenov**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **B.N. Mukhashev**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **M.O. Otelbayev**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **N.Zh. Takibayev**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **S.N. Kharin**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **M.Ye. Abishev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **Zh.Sh. Zhantayev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **M.N. Kalimoldayev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **V.N. Kosov**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **T.A. Mussabayev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **R. Oinarov**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **T.S. Ramazanov**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK (deputy editor); **N.M. Temirbekov**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **U.U. Umirbayev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK

Editorial staff:

**I.N. Vishnievski**, NAS Ukraine academician (Ukraine); **A.M. Kovalev**, NAS Ukraine academician (Ukraine); **A.A. Mikhalevich**, NAS Belarus academician (Belarus); **A. Pashayev**, NAS Azerbaijan academician (Azerbaijan); **I. Tighineanu**, NAS Moldova academician (Moldova); **Joseph Banas**, prof. (Poland).

**News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Physical-mathematical series.**  
**ISSN 1991-346X**

Owner: RPA "National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan" (Almaty)

The certificate of registration of a periodic printed publication in the Committee of information and archives of the Ministry of culture and information of the Republic of Kazakhstan N 5543-Ж, issued 01.06.2006

Periodicity: 6 times a year

Circulation: 300 copies

Editorial address: 28, Shevchenko str., of. 219, 220, Almaty, 050010, tel. 272-13-19, 272-13-18,

[www.nauka-nanrk.kz](http://www.nauka-nanrk.kz) / [physics-mathematics.kz](http://physics-mathematics.kz)

---

© National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, 2015

Address of printing house: ST "Aruna", 75, Muratbayev str, Almaty

**NEWS**

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

**PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES**

ISSN 1991-346X

Volume 1, Number 299 (2015), 20 – 31

**OPTIMIZATION OF LAYERED AND COMPOSITE BLADES' STRESS  
CONDITION WITH DIFFERENT PHYSICAL-AND-MECHANICAL  
PROPERTIES IN THE FIELD OF CENTRIFUGAL FORCES**

**A. U. Nurimbetov, S. A. Orynbayev, A. B. Bekbayev, B. K. Baibutanov**

Kazakh national technical university after K. I. Satpayev, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: seitzhan\_74@mail.ru

**Key words:** blade, torsion, tension, strain, stress, fiberglass.

**Abstract.** In work, using the received technical theory of torsion of a composite layered core of any section, the program is made, allowing numerically to define the strained-deformed condition (s.d.c) of the composite core of any section or a shovel, being in the field of centrifugal forces. The natural-twirled layered core is under incorporated action of the stretching forces, bending and braiding moments or under the influence of centrifugal forces. In the program the technological problem of cutting hovels on the layers, parallel to a core axis, is solved. A shovel, investigated in the givenwork, is presented by three sections.

УДК 539.4

**ОПТИМИЗАЦИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ  
СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ЛОПАТОК  
С РАЗЛИЧНЫМИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ  
СВОЙСТВАМИ СЛОЕВ В ПОЛЕ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СИЛ**

**А. У. Нурымбетов, С. А. Орынбаев, А. Б. Бекбаев, Б. К. Байбутанов**

Казахский национальный технический университет им. К. И. Сатпаева, Алматы, Казахстан

**Ключевые слова:** лопатка, кручение, растяжение, деформация, напряжения, стеклопластик.

**Аннотация.** В работе, используя полученную техническую теорию кручения композиционного слоистого стержня произвольного сечения, составлена программа, позволяющая численно определить напряженно-деформированное состояние (НДС) слоистой композиционной лопатки, находящейся в поле центробежных сил. Естественно-закрученная слоистая композиционная лопатка находится под объединенным действием растягивающих сил, изгибающих и скручивающих моментов или под влиянием центробежных сил. В программе решена технологическая проблема раскроя лопатки на лепестки в плоскостях, параллельных оси стержня. Лопатка, исследованная в данной работе, представлена тремя сечениями.

**Введение.** Очертание лопаток в перспективных ветродвигателях становятся более сложными. Наблюдается переход в конструкциях лопаток вентиляторов ветротурбин от очертаний, близких к стержням с закруткой и большим относительным удлинением, к очертаниям типа пластин с малым относительным удлинением, большой закруткой и кривизной. Вместо современных металлических сплавов начинают применять интерметаллические соединения, композиты с металлической матрицей и композиты с керамической матрицей. По мере совершенствования методов расчета современных ветродвигателей геометрические характеристики, аэродинамические и температурные нагрузки облопаченных дисков и барабанов становятся более определенными, что дает

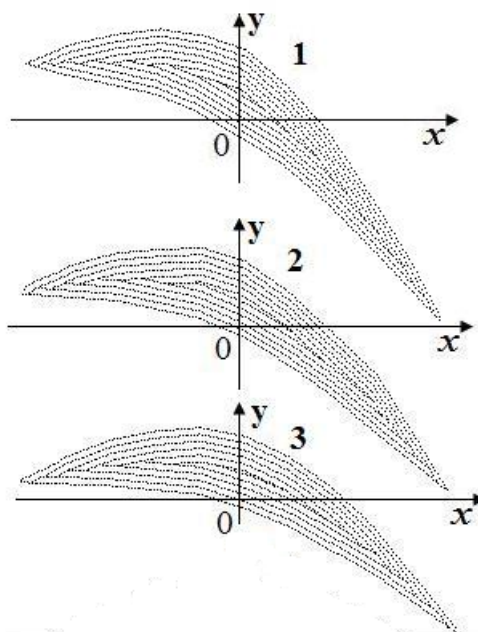
возможность применять численные методы для определения напряженно-деформированного состояния (НДС) лопаток. Перспективные модели ветротурбин имеют лопасти с большим углом стреловидности, закрученные по размаху и изогнутые, относительно оси вращения. Эти лопасти должны работать в весьма сложных и тяжелых аэромеханических условиях.

Подобные конструкции известны уже давно, но до сих пор отсутствовали средства для их расчета и материалы для их изготовления. В настоящее время благодаря появлению быстродействующих ЭВМ и сложного инженерного программного обеспечения, а также наличию современных композиционных материалов стал возможным более тщательный и точный анализ лопастей перспективных ветродвигателей. Поэтому, используя полученные в [1] материалы, была составлена программа расчета на ЭВМ, которая позволяет численно определить НДС лопаток из композиционного материала (КМ).

**Исследования.** Составлена программа, предназначенная для исследования НДС естественно-закрученных слоистых стержневых конструкций, которые находятся под совместным действием растягивающих сил, изгибающих и крутящих моментов или под действием центробежных сил. Каждый слой исследуемого сечения стержня состоит из ортотропного материала с 9 независимыми упругими постоянными. При этом целенаправленное регулирование общих свойств конкретного материала может быть осуществлено путем выбора как схемы укладки волокон в отдельном слое, так и расположением слоев с известными свойствами в сечении. Это достигается изменением углов  $\varphi_i$  между главными направлениями упругой симметрии материала в слое и осями, в которых исследуется НДС тела. При этом количество независимых упругих постоянных материала слоя в общем случае будет равно 13 [1].

Поперечное сечение рассматриваемых стержневых конструкций является произвольным. Входными параметрами программы являются координаты линии, ограничивающей отдельное произвольное плоское сечение, обычно задаваемое в рабочих чертежах проекта. Это линия разбивается на две части (условно называемое впредь "спинка" и "корытце"), к которым прилегают две наружные в сечении слоя. Координаты наружной поверхности упомянутых слоев задаются. Исходя из этих начальных данных с помощью специальной процедуры, сечение произвольной конфигурации разбивается на отдельные слои по заданной толщине  $t_c$  монослоя [3]. При этом формируются номера начала и конца каждого слоя. Такие построения проводятся для ряда следующих друг за другом сечений стержня (рисунок 1). Так как размеры сечения могут меняться вдоль длины стержня, то и число слоев в каждом сечении может оказаться различным. Это предопределяет появление коротких слоев внутри сечения. Взятые из разных сечений координаты начала и конца одного слоя определяют длину лепестка в текущем сечении стержня.

Рисунок 1 – Построенные слои поперечных сечений лопатки; номера сечений лопатки соответствуют сечениям, удаленным от ее корневого сечения



Следовательно, в программе решена технологическая задача "раскроя" каждого слоя стержня на лепестки в плоскостях, параллельных оси стержня.

Для исследования НДС слоистого стержня используются основные соотношения разработанной технической теории слоистых стержней [1-4]. На основе этой теории для каждого сечения вычисляются деформации растяжения  $\varepsilon$ , изменения кривизны  $\chi_1, \chi_2$  и раскрутка  $\tau$ , а также напряжения  $\sigma_{11}^i, \sigma_{22}^i, \sigma_{33}^i, \sigma_{23}^i, \sigma_{13}^i, \sigma_{12}^i$  в отдельных точках слоя  $i$ .

Входными параметрами для программы являются растягивающее усилие  $P$ , изгибающие  $M_1, M_2$  и крутящий  $M_t$  моменты, а также 13 упругих постоянных каждого слоя [1] для текущего слоя. Координаты и номера построенных точек слоев также являются входными параметрами для текущего сечения.

Для исследования НДС стержня в поле центробежных сил, растягивающее усилие, действующее в текущем сечении, вычисляется по формуле

$$P_r = P = \omega^2 \int_0^R \left( \int_{F(r_1)} \rho dF \right) r_1 dr_1 \quad (1)$$

где  $F(r_1)$  – площадь поперечного сечения;  $r, R$  – расстояние от оси вращения до центра тяжести текущего  $r$  и периферийного  $R$  сечения соответственно (рисунок 2);  $\omega = \pi \cdot N / 30$  угловая скорость (рад.обор./с.), где  $N$  – частота вращения (обор./мин.);  $r_1$  – переменная интегрирования;  $\rho$  – плотность материала слоя сечения.

Таким образом, усилие  $P$  в текущем сечении  $r$  равно по величине центробежной силе инерции, развиваемой частью слоистого стержня, заключенной между рассматриваемым сечением  $r$  и периферийным сечением  $R$ .

Для вычисления центробежного усилия по формуле (1) и координат центра тяжести текущего сечения необходимы данные о геометрических характеристиках всех сечений. Для этого сначала вычисляются с помощью специальной процедуры 15 геометрических характеристик и приведенные плотности всех сечений.

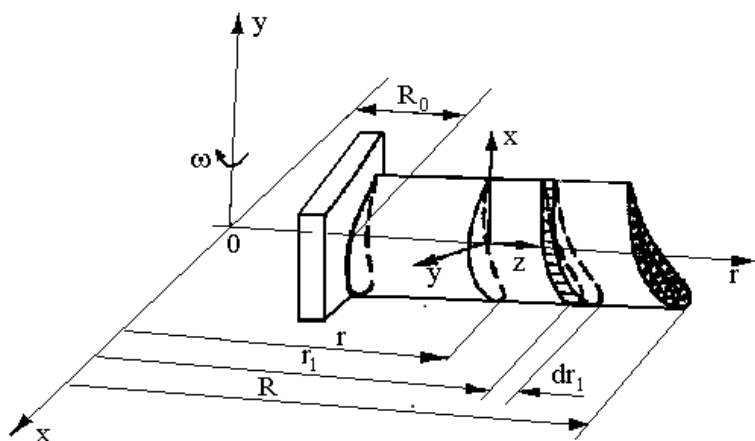


Рисунок 2 –  
Расстояния от оси вращения до центра тяжести текущего  $r$  и периферийного  $R$  сечения

Вычисляется центробежное усилие для текущего сечения  $r$  по приближенной аппроксимационной для (1) формуле

$$P_r = \omega^2 \sum_{i=1}^R \int_{r_i}^{r_{i+1}} F \rho r_1 dr, \quad (2)$$

в которой площадь и плотность текущего сечения изменяются линейно относительно предыдущего сечения, т.е.

$$F = F_i + (r_1 - r_i)(F_{i+1} - F_i)/(r_{i+1} - r_i), \quad (3)$$

$$\rho = \rho_i + (r_1 - r_i)(\rho_{i+1} - \rho_i)/(r_{i+1} - r_i).$$

Далее для текущего сечения исследуется НДС слоистого стержня. Определяются деформации растяжения  $\varepsilon$ , изменения кривизны  $\chi_1$ ,  $\chi_2$  и раскрутка  $\tau$ , вычисляются физико-геометрические характеристики слоя и всего сечения.

Программа, используемая в описанных ниже расчетах, в настоящее время используется для анализа НДС лопастей на этапе эскизного проектирования.

Рассматриваемая модель лопасти является вариантом натурной лопасти ротора ветроэнергетической установки. Это лопасть была спроектирована и изготовлена с таким расчетом, чтобы соблюдалась конструктивная и аэродинамическая эквивалентность реальной лопасти. Лопасть, исследуемая в данной работе, представлена тремя сечениями. На рисунке 3 приведены изменения наибольшей толщины  $c_{\max}$ , относительный угол закрутки  $\tau_0$  в зависимости от  $r$ . Длина хорды постоянная и равна 130 мм.,  $N=1000$  об./мин., длина от корневого до периферийного сечения 375 мм.

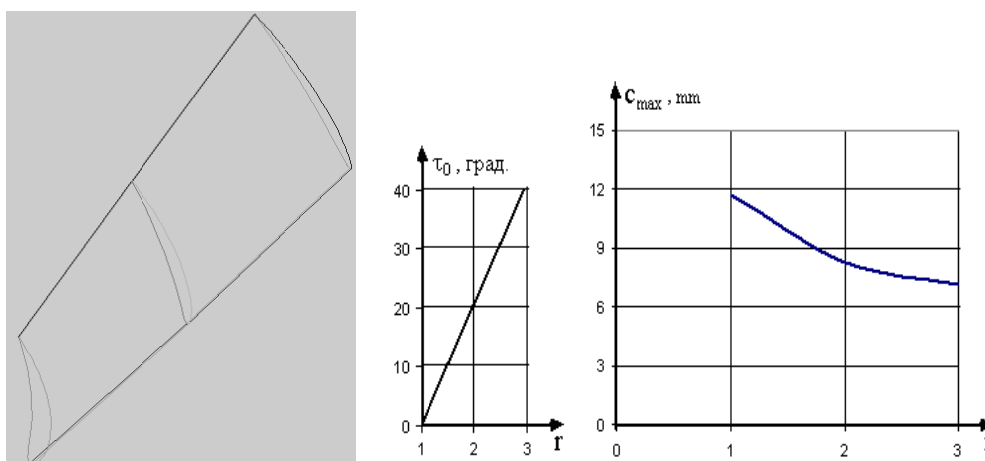


Рисунок 3 – Изменение угол закрутки на единицу длины лопасти  $\tau_0$  и  $c_{\max}$  по длине лопасти

**Расчетные варианты.** В качестве примера по описанной программе была рассчитана лопасть из композиционного материала в поле центробежных сил. При этом было проведено исследование для трех различных вариантов сочетаний упругих постоянных в пакете слоев композиционной лопасти.

В первом варианте рассматривалась лопасть, состоящая из чередующихся со стороны спинки и корытца слоев керамики (SiC).

Во втором варианте рассматривалась лопасть, состоящая из чередующихся со стороны спинки и корытца слоев бороалюминия (BAL).

В третьем варианте рассматривалась лопасть, состоящая из чередующихся со стороны спинки и корытца слоев стеклопластика.

**Анализ результатов расчетов.** Растягивающее усилие  $P$  при вращении лопасти вычислено по формуле (1) для каждого ее сечения  $r/R_0$ . Усредненные значения растягивающих напряжений  $\sigma_{\text{ср}}$  в условной незакрученной лопасти достигают наибольшего значения во втором сечении. Это связано с тем, что усилие  $P$  в третьем сечении отличается от усилия в корневом на 15%, в то время как их площади отличаются на 40%. Для лопаток 2-го типа усредненные напряжения  $\sigma_{\text{ср}}$  превышают соответствующие величины в лопатках 1, 3 типов. Это связано с тем, что в лопатке 2-го типа имеется более высокий уровень центробежных нагрузок.

По результатам расчетов построены изолинии распределения нормального перемещения  $W$  по длине лопасти для спинки и корытца (рисунок 4). Как видно из рисунка нормальные перемещения  $W$  на периферийном сечении имеют максимальные значения. На входной кромке спинки от корневого сечения до третьего сечения перемещения  $W$  растут 4-5 раз, а на тонких выходных кромках они растут 10 раз. Распределение нормального перемещения  $W$  на спинке более равномерно по сравнению с корытцем лопасти. На корытце концентрация больших перемещений  $W$  наблюдается уже во втором сечении лопасти. Поэтому, чтобы увеличить прочность лопасти необходимо слой со стороны корытца заменить материалами более жесткими на растяжение.



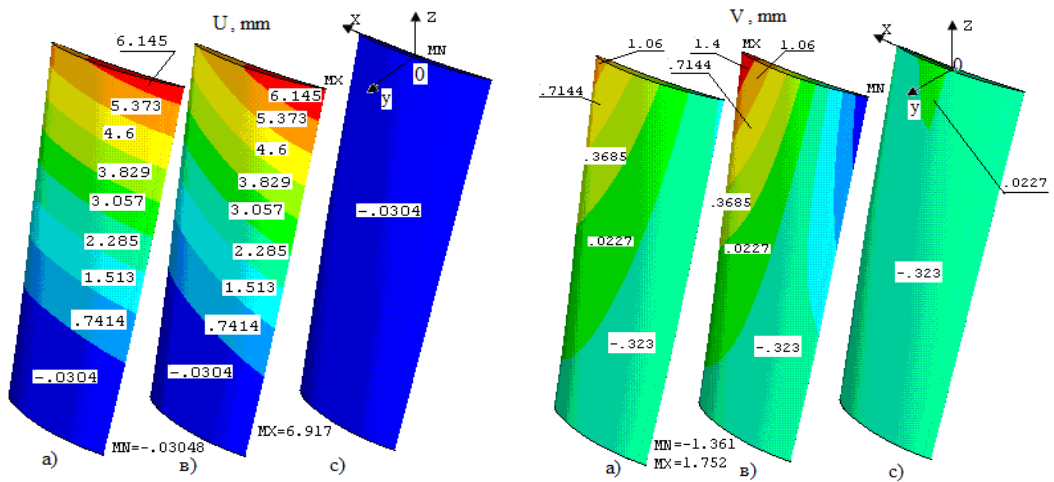


Рисунок 4 – Распределение перемещений  $U$  и  $V$  на спинке по длине лопатки из а) карбида кремния в) бороалюминия с) стеклопластика

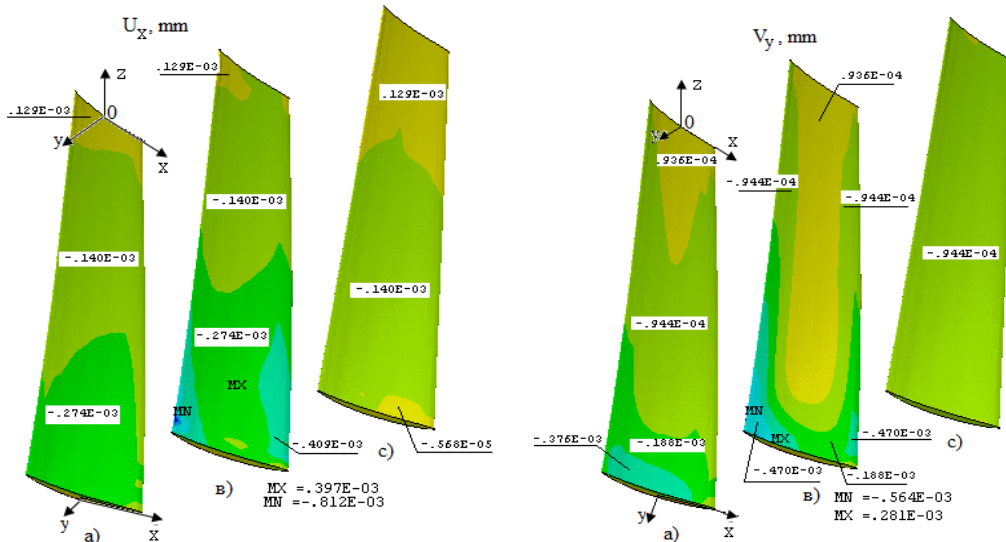


Рисунок 4 – Распределение деформации  $U_x$  и  $V_y$  на корытце по длине лопатки из а) карбида кремния в) бороалюминия с) стеклопластика

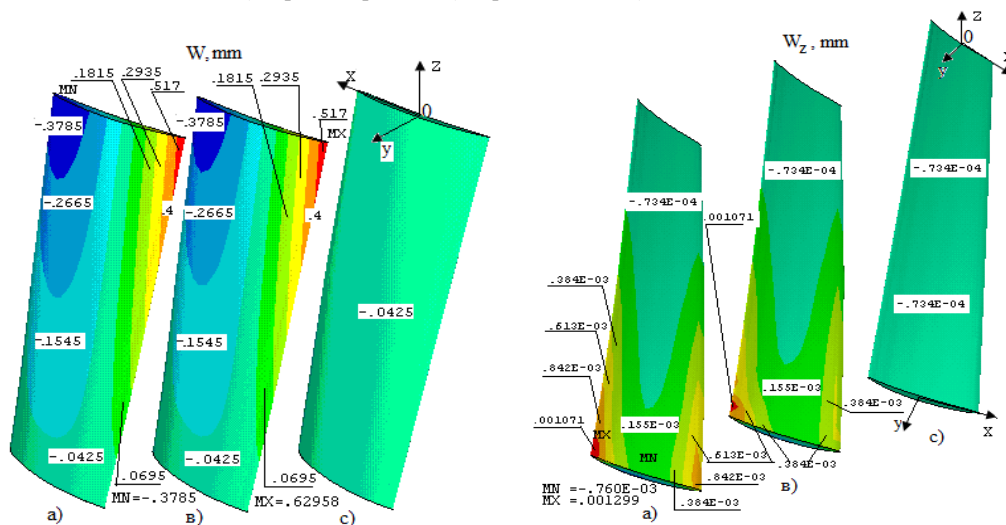


Рисунок 4 – Распределение перемещений  $W$  на спинке и деформации  $W_z$  на корытце по длине лопатки из а) карбида кремния в) бороалюминия с) стеклопластика

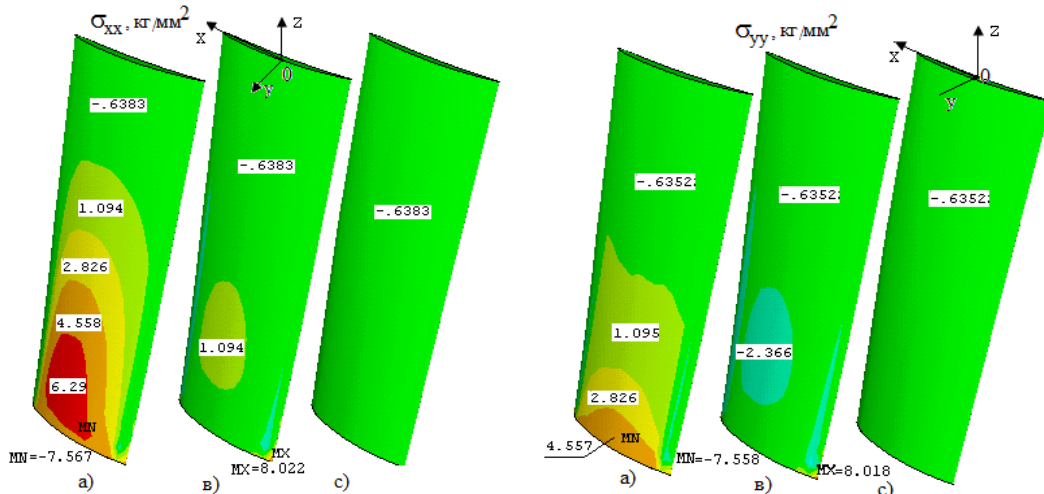


Рисунок 5 – Распределение напряжения  $\sigma_{xx}$  и  $\sigma_{yy}$  на спинке по длине лопатки из а) карбида кремния в) бороалюминия с) стеклопластика

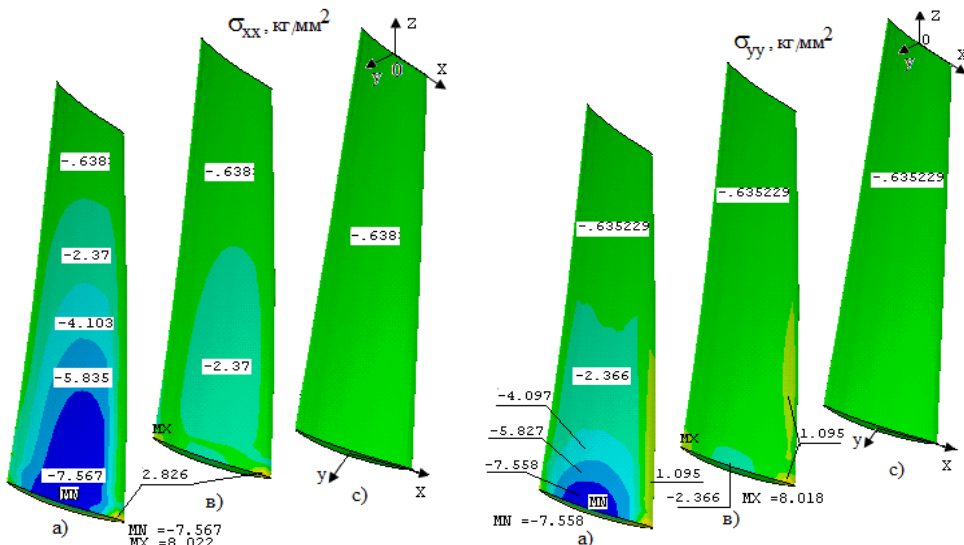


Рисунок 5 – Распределение напряжения  $\sigma_{xx}$  и  $\sigma_{yy}$  на корытце по длине лопатки из а) карбида кремния в) бороалюминия с) стеклопластика

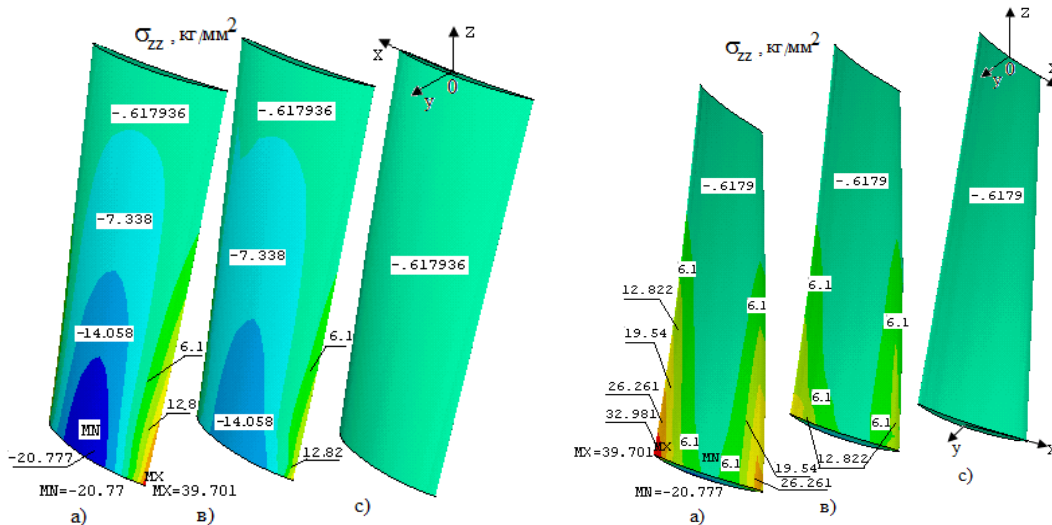


Рисунок 5 – Распределение нормального напряжения  $\sigma_{zz}$  на спинке и на корытце по длине лопатки из а) карбида кремния в) бороалюминия с) стеклопластика

На рисунке 5 приведено распределение нормальных напряжений  $\sigma_{zz}$  на спинке и на корытце по длине лопатки. Наибольшее нормальное напряжение распределено на корневом сечении лопатки (точка М), так как корневое сечение лопатки жестко закреплено. Если это не учитывать, то наибольшие напряжения достигаются во втором сечении лопатки и концентрация нормальных напряжений на корытце больше 1,5-2 раза по сравнению нормальными напряжениями на спинке. Концентрация нормальных напряжений на третьем сечении меньше 9-10 раз по сравнению с его значениями на корневом сечении.

На рисунке 6 приведено распределение касательных напряжений  $\sigma_{yz}$  на спинке и на корытце по длине лопатки. Наибольшие касательные напряжения распределены на втором сечении лопатки. Локальное наибольшее растягивающее касательное напряжение  $\sigma_{yz}$  достигается на корневом сечении у входной кромки спинки, а сжимающее – на выходной кромке корытца и его значение (точка N) больше в 2 раза по сравнению с значениями  $\sigma_{yz}$  у входной кромки спинки (точка М). Как известно, в тонких слоях такие концентрации касательных напряжений могут привести к местной потере прочности лопатки. Вследствие этого возникновение вышеуказанных величин касательных напряжений в лопатках может оказаться не допустимым. Экспериментально установлено, что запас прочности по касательным напряжениям между слоями в настоящее время не должно быть меньше трех [3].

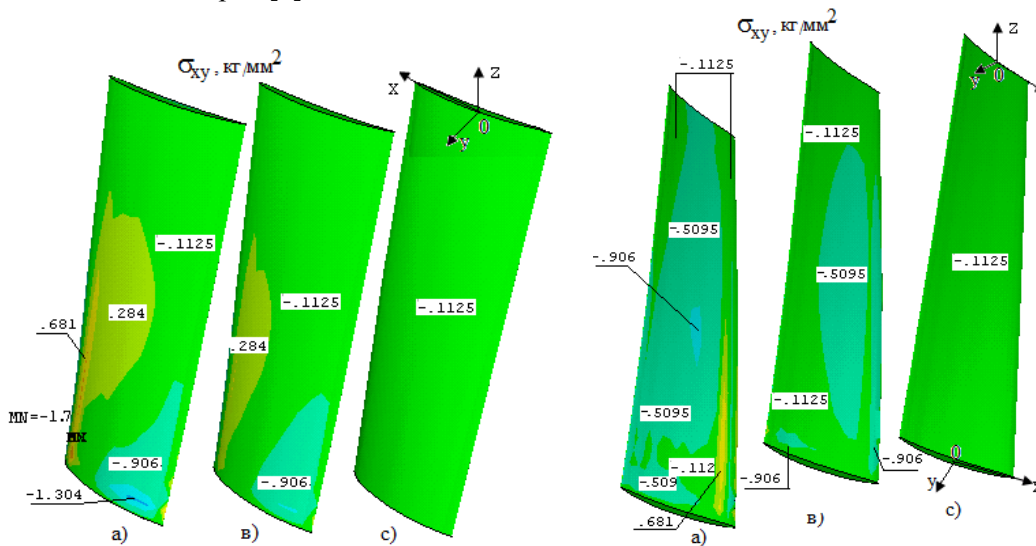


Рисунок 6 – Распределение касательного напряжения  $\sigma_{xy}$  на спинке и на корытце по длине лопатки из а) карбида кремния в) бороалюминия с) стеклопластика

На рисунке 7 приведено распределение касательных напряжений  $\sigma_{xz}$  на спинке и на корытце по длине лопатки. Наибольшие касательные напряжения распределены на втором сечении лопатки. Локальное наибольшее растягивающее касательное напряжение  $\sigma_{xz}$  достигается на втором сечении на спинке, а сжимающее – на корытце. Касательные напряжения  $\sigma_{xz}$  по величине в два раза меньше, чем касательные напряжения  $\sigma_{yz}$  и распределяются относительно на толстых слоях спинки и корытца. Поэтому по сравнению с касательными напряжениями  $\sigma_{yz}$  их влияние на общую прочность лопатки незначительны.

Касательные напряжения  $\sigma_{xy}$  своего наибольшего значения достигают во втором сечении (точка N) (рисунок 8). По сравнению с значениями касательных напряжений  $\sigma_{yz}$ ,  $\sigma_{xz}$ , касательное напряжение  $\sigma_{xy}$  незначительно. Поэтому его можно не учитывать при расчетах.

На рисунке 9 приведена деформация лопатки относительно оси  $Ox$  (пунктирные линии). Наибольшее изменение происходит на третьем сечении лопатки. Значение сжимающей деформации относительно оси  $Ox$  на выходной кромке в 3 раза больше чем на входной кромке лопатки. Вследствие этого в тонких слоях выходной кромки могут происходить местные потери прочности и поэтому эти слои необходимо заменить материалами со свойствами более прочными на сжатие.

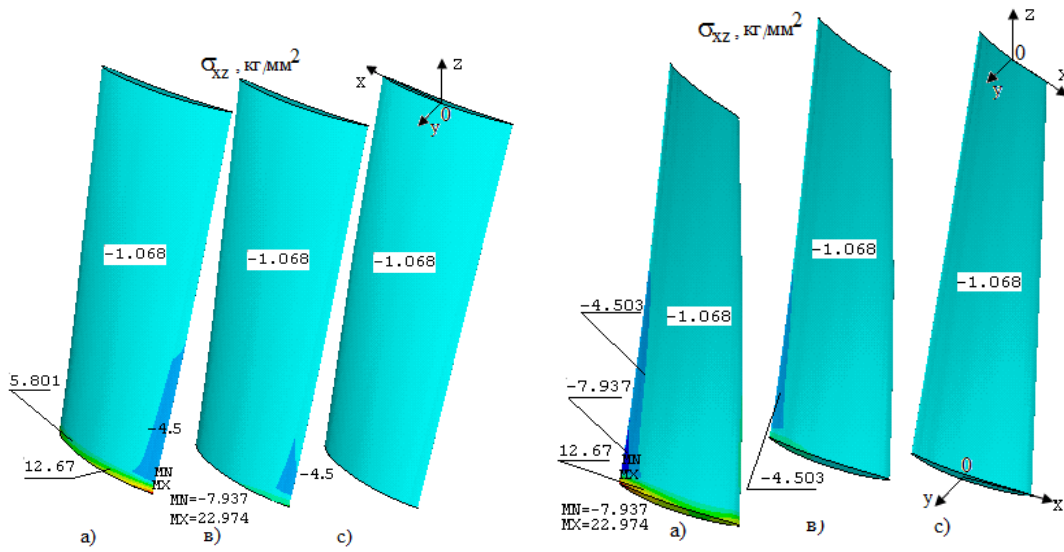


Рисунок 7 – Распределение касательного напряжения  $\sigma_{xz}$  на спинке и на корытце по длине лопатки из а) карбида кремния в) бороалюминия с) стеклопластика

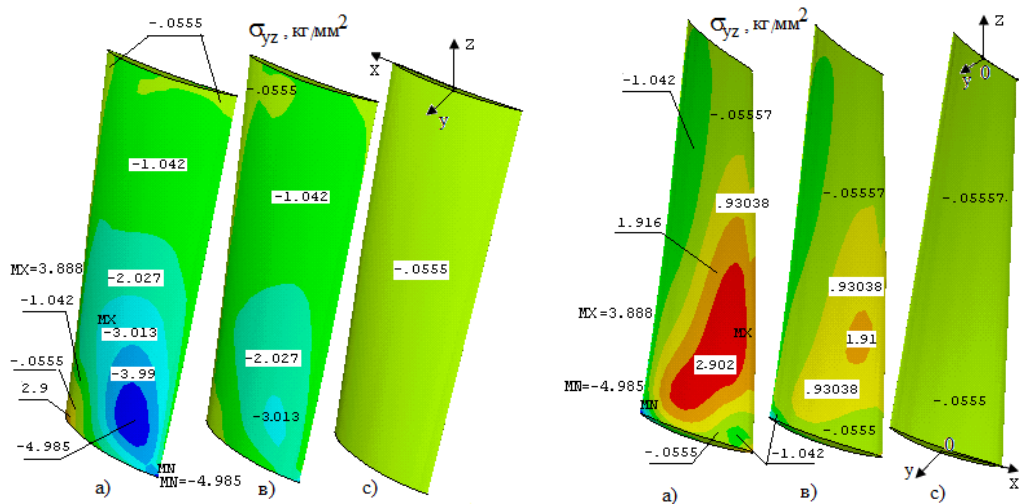


Рисунок 8 – Распределение касательного напряжения  $\sigma_{yz}$  на спинке и на корытце по длине лопатки из а) карбида кремния в) бороалюминия с) стеклопластика

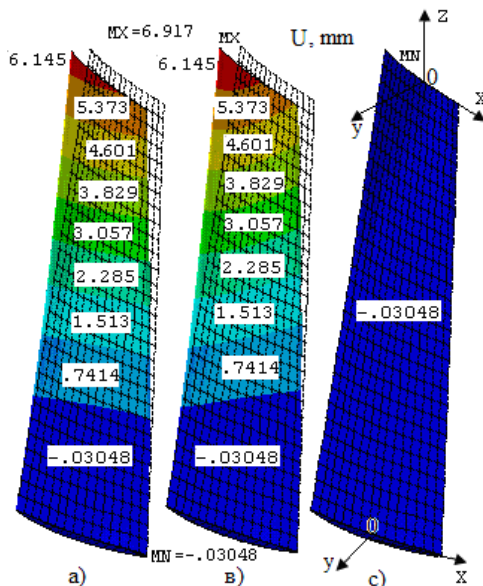


Рисунок 9 – Распределение перемещения  $U$  относительно оси  $Ox$  (пунктирные линии) на корытце по длине лопатки из а) карбида кремния в) бороалюминия с) стеклопластика

На рисунке 10 приведена деформация лопатки относительно оси  $Oy$  (пунктирные линии). Наибольшее изменение происходит на третьем сечении лопатки. Значение растягивающих деформации относительно оси  $Oy$  на выходной кромке в 2 раза больше чем на выходной кромке второго сечения лопатки и по своему значению больше в 3 раза чем сжимающая деформация относительно оси  $Ox$ . Следовательно, в тонких слоях выходной кромки, чтобы избежать потери прочности от сжимающих и растягивающих деформации, эти слои необходимо заменить материалами со свойствами более прочными на растяжение и сжатие.

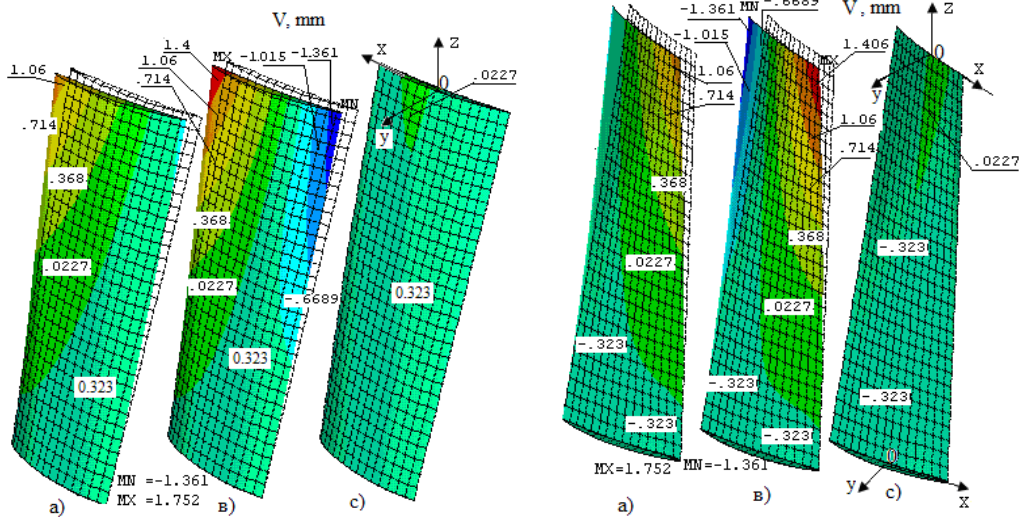


Рисунок 10 – Распределение перемещении  $V$  относительно оси  $Oy$  (пунктирные линии) на спинке и на корытце по длине лопатки из а) карбида кремния в) бороалюминия с) стеклопластика

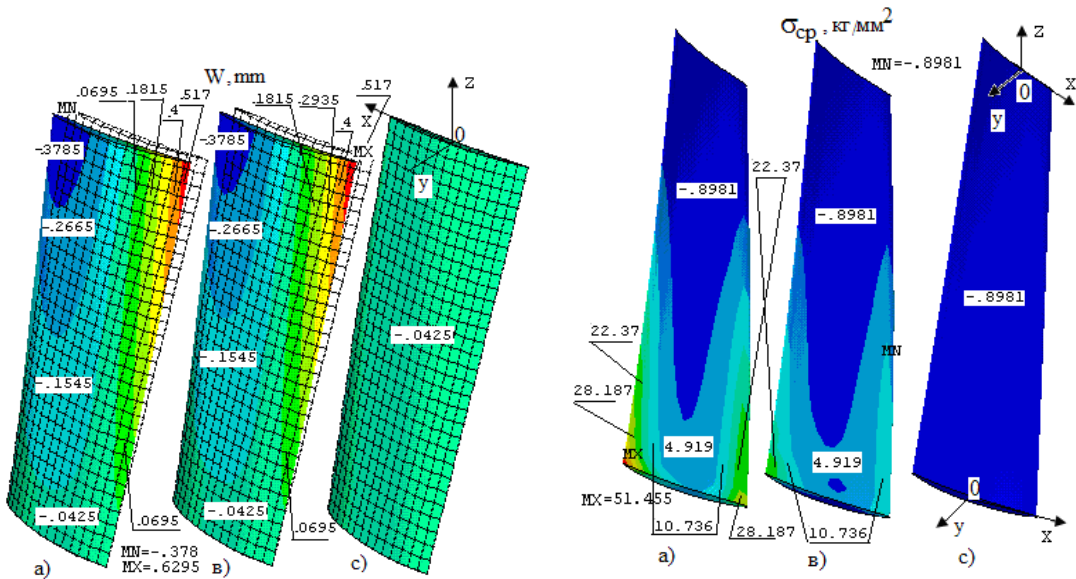


Рисунок 10 – Распределение перемещении  $W$  относительно оси  $Oz$  (пунктирные линии) на спинке и результирующего среднего напряжения на корытце по длине лопатки из а) карбида кремния в) бороалюминия с) стеклопластика

На рисунке 11 приведены изолинии распределения нормального напряжения  $\sigma_{zz}$  во 2, 3 сечениях лопатки. Из рисунка видно, что зона концентрации нормального напряжения  $\sigma_{zz}$  на корытце больше по своему значению на 20% от нормальных напряжении  $\sigma_{zz}$  на спинке и наибольшие нормальные напряжения происходят на втором сечении лопатки. Наибольшие нормальные напряжения  $\sigma_{zz}$  происходят в близлежащих к центру тяжести слоях корытца и концентрация нормальных напряжении 2-го сечения больше 2-3 раза значении нормальных напряжении 3-го сечения лопатки. Вследствие этого необходимо подбирать материалы слоев близлежащих к центру тяжести сечения с свойствами более прочными на растяжение.

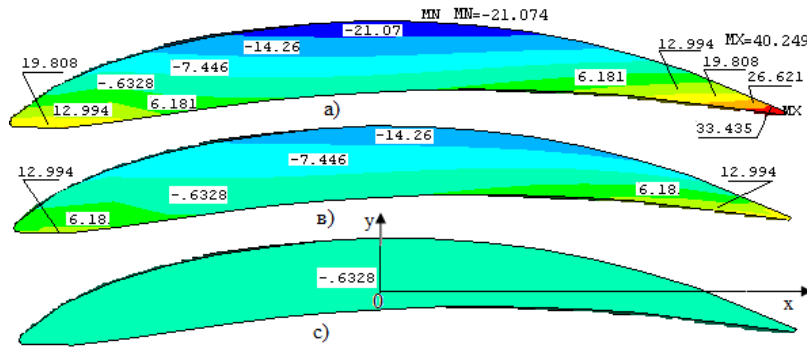


Рисунок 11 – Распределение нормального напряжения  $\sigma_{zz}$  (кг/мм<sup>2</sup>) во 2-ом сечении лопатки из а) карбида кремния в) бороалюминия с) стеклопластика

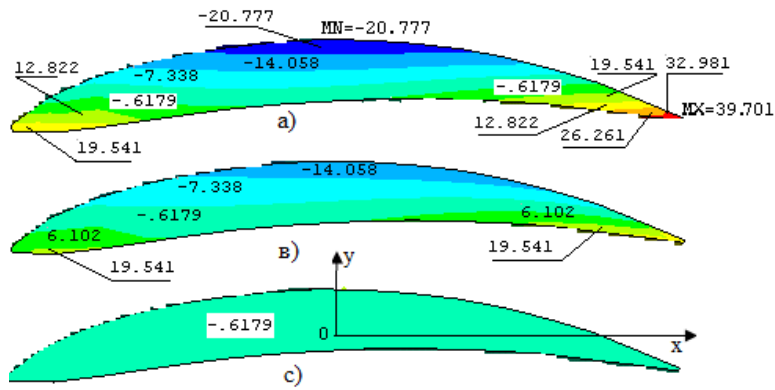


Рисунок 11 – Распределение нормального напряжения  $\sigma_{zz}$  (кг/мм<sup>2</sup>) в 3-ем сечении лопатки из а) карбида кремния в) бороалюминия с) стеклопластика

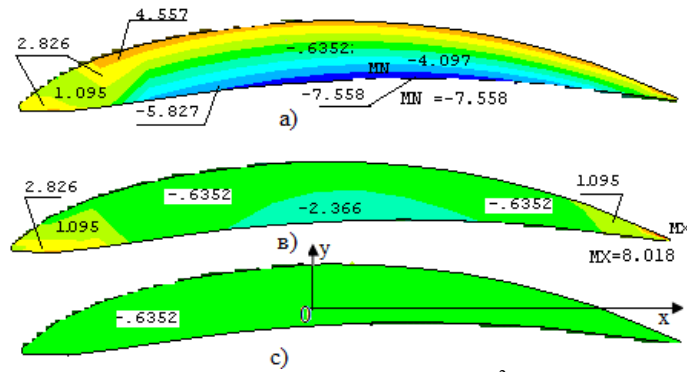


Рисунок 11 – Распределение напряжения  $\sigma_{yy}$  (кг/мм<sup>2</sup>) во 2 сечении лопатки из а) карбида кремния в) бороалюминия с) стеклопластика

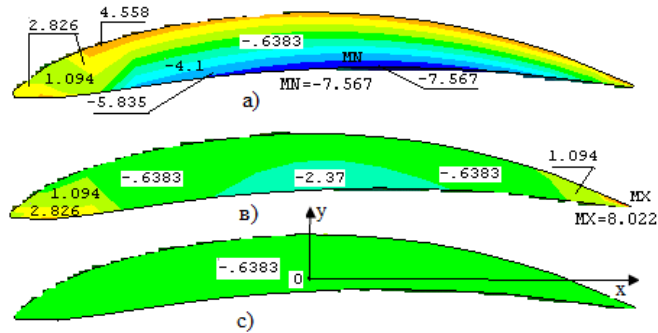


Рисунок 11 – Распределение напряжения  $\sigma_{xx}$  (кг/мм<sup>2</sup>) во 2 сечении лопатки из а) карбида кремния в) бороалюминия с) стеклопластика

Таким образом, распределения касательного напряжения  $\sigma_{xy}$  во 2, 3 сечениях лопатки показывают, что зона концентрации касательного напряжения  $\sigma_{xy}$  меньше по своему значению на 200-300% от нормальных напряжений  $\sigma_{zz}$  и наибольшие касательные напряжения  $\sigma_{xy}$  происходят на третьем сечении лопатки. Наибольшие касательные напряжения  $\sigma_{xy}$  происходят в близлежащих к центру тяжести слоях корытца и концентрация касательных напряжений 3-го сечения больше 20-30 раз от значения касательных напряжений 2-го сечения лопатки. В тонких слоях (3 сечение) входной и выходной кромки лопатки сжимающие касательные напряжения распределены равномерно и их значения от наибольшего значения (в близлежащих к центру тяжести слоях) сжимающего касательного напряжения больше чем на 4 раза. Поэтому материалы в слоях близлежащих к центру тяжести должны иметь свойства более прочные на растяжение и сжатие.

Изолинии распределения касательного напряжения  $\sigma_{yz}$  во 2, 3 сечениях лопатки показывают, что зона распределения касательного напряжения  $\sigma_{yz}$  меньше по своему значению в 40-50 раз от нормальных напряжений  $\sigma_{zz}$  и наибольшие касательные напряжения  $\sigma_{yz}$  происходят на втором сечении лопатки. Наибольшие растягивающие касательные напряжения  $\sigma_{yz}$  распределяются в слоях входной кромки лопатки и по своему значению незначительны.

Изолинии распределения касательного напряжения  $\sigma_{xz}$  во 2, 3 сечениях лопатки показывают, что зона распределения касательного напряжения  $\sigma_{xz}$  меньше по своему значению в 4-5 раз от нормальных напряжений  $\sigma_{zz}$  и наибольшие касательные напряжения  $\sigma_{xz}$  происходят на втором сечении лопатки. Наибольшие растягивающие касательные напряжения  $\sigma_{xz}$  распределяются в слоях на средней части спинки, а на корытце - сжимающие касательные напряжения. В тонких слоях (2 сечение) выходной кромки лопатки сжимающие касательные напряжения распределены равномерно и по своему значению незначительны. Наибольшие касательные напряжения  $\sigma_{xz}$  по своему значению больше в 5-10 раз по сравнению с значениями касательного напряжения  $\sigma_{yz}$  и от значения нормального напряжения меньше в 4-5 раз. Поэтому для слоистых тонких стержней учет влияния касательного напряжения  $\sigma_{xz}$  необходим.

**Выводы.** Таким образом, в исследованных примерах показано, что путем выбора материала отдельных слоев или способа армирования в них можно в широких пределах управлять уровнями напряжений и деформаций при одних и тех же физических оборотах ротора. Для лопаток из изотропного материала такой широкой возможности регулирования не имеется.

Таким образом, при заданной геометрической форме лопатки, выбираемой из аэродинамических соображений, посредством перекрестного армирования ее слоев уровень напряжений  $\sigma_{zz}$  можно уменьшить, одновременно избежав больших сжимающих напряжений на кромках профиля и достичь более равномерного распределения их ( $\sigma_{zz}$ ) по сечению.

Проведенные расчеты лопаток конкретных типов показали, что угол раскрутки периферийного сечения лопатки можно уменьшить, как увеличивая жесткость на кручение посредством пере-крестного армирования слоев, так и применяя в пакете материала слоев из жесткого материала на растяжение. При возрастании уровня отношения характеристик жесткости слоев, неравномерность нормальных напряжений в поперечном сечении и величина касательных напряжений между слоями увеличиваются. Наличие больших касательных напряжений между слоями возникает из-за различной жесткости контактирующих слоев. Необходим плавный переход свойств материала от слоя к слою.

Численные исследования естественно-закрученных стержней из КМ выявили зависимость угла раскрутки и степени неравномерности распределения нормальных напряжений в поперечном сечении от коэффициента упругости  $c_{mn}^i$  слоя  $i$ , а также взаимосвязанность деформации растяжения и раскрутки при растяжении [1].

Анализ работы многослойных КМ, в условиях близких к рабочим условиям лопаток позволил выявить ряд особенностей распределения напряжений в армированных материалах. Установлено, что при растяжении лопаток из КМ, в поле центробежных сил во внешних слоях происходит увеличение нормальных напряжений в 2-4 раз по сравнению со средними их величинами.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Нуриббетов А.У. Техническая теория кручения композиционного слоистого стержня произвольного сечения // Известия Самарского научного центра РАН. – 2009. – Т. 11, № 5. – С. 94-101.
- [2] Нуриббетов А.У., Туреханова Г.И., Жанбосынов Р.С. Деформация естественно-закрученных многослойных анизотропных стержней при кручении и растяжении // Materiály IX mezinárodní vědecko – praktická konference «Moderní využitosti vědy – 2013». – Díl 73. Technické vědy: Praha. Publishing House «Education and Science» s.r.o – 96 stran. С. 17-22.
- [3] Нуриббетов А.У. Автоматизированное проектирование раскроя деталей произвольного поперечного сечения из слоистых композиционных материалов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия «Инженерные исследования». – 2009. – № 3. – С. 97-106.
- [4] Нуриббетов А.У., Шевченко И.В. Оптимизация напряженно-деформированного состояния слоистых композиционных лопаток и стержней произвольного сечения в поле центробежных сил // Авиационная промышленность. – М., 2009. – № 4. – С. 34-41.

## REFERENCES

- [1] Nurimbetov A.U. Technical theory of torsion of composite layered rod of arbitrary cross-section // *Izvestija Samarskogo nauchnogo centra RAN*, 2009, Vol. 11, N 5, p. 94-101 (in Russ.).
- [2] Nurimbetov A.U., Turehanova G.I., Zhanbosynov R.S. Deformation of naturally-swirled multilayered anisotropic torsional and tensile rods // *Díl 73. Technické vědy: Praha. Publishing House «Education and Science» s.r.o - 96 stran, p. 17-22 (in Russ.)*.
- [3] Nurimbetov A.U. Automated design of cutting parts of arbitrary cross-section of laminated composite materials // *Vestnik Rossijskogo universiteta družby narodov. Serija «Inzhenernye issledovanija»*, 2009, N 3, p. 97-106 (in Russ.).
- [4] Nurimbetov A.U., Shevchenko I.V. Optimization of stressed-strained state of layered composite blades and cores of arbitrary section in centrifugal force field // *Aviacionnaja promyshlennost'*, M., 2009, N 4, p. 34-41 (in Russ.).

**ОРТАЛЫҚ ЖҮГІРМЕ КҮШТЕР ӨРІСІНДЕГІ ҚАБАТТАРЫ  
ӨРТҮРЛІ ФИЗИКО-МЕХАНИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІ ИЕ ҚӨП ҚАБАТТЫ  
КОМПОЗИТТІК ҚАЛАҚШАЛАРДЫҢ КЕРНЕУЛІ КҮЙІН ОҢТАЛАНДЫРУ**

**А. У. Нуриббетов, С. А. Орынбаев, А. Б. Бекбаев, Б. К. Байбутанов**

Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық университеті, Алматы, Қазақстан

**Тірек сөздер:** қалақша, майыстыру, созу, деформация, кернеу, шыныпластик.

**Аннотация.** Жұмыста кескіндісі кез-келген қабатты композитті білікті майыстырудың техникалық теориясын қолданып, орталық жүгірме күштер өрісіндегі қабатты композиттік қалақшалардың кернеулі-деформациялық күйін сан күйінде анықтауға арналған бағдарлама құрастырылды. Бұралған қабатты композиттік қалақша біріккен созушы, майыстырушы және бұраушы күштердің немесе орталық жүгірме күштер әсеріне ортасында. Бағдарламады қалақшаны білік осіне қатар жазықтықтарды жапырақтарға кескіндеудің технологиялық мәселесі шешілген. Жұмыста зерттелген қалақша үш кескін түрінде қабылданған.

*Поступила 27.01.2015 г.*



Правила оформления статьи для публикации в журнале смотреть на сайте:

[www.nauka-nanrk.kz](http://www.nauka-nanrk.kz)  
[physics-mathematics.kz](http://physics-mathematics.kz)

Редактор *М. С. Ахметова*  
Верстка на компьютере *Д. Н. Калкабековой*

Подписано в печать 10.02.2015.  
Формат 60x881/8. Бумага офсетная. Печать – ризограф.  
4,7 п.л. Тираж 300. Заказ 1.