

1568948

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

На правах рукописи

Мягков Леонид Львович

**Методика расчёта напряженно-деформированного
состояния шатуна из композиционного материала
быстроходного автомобильного двигателя**

05.04.02 – тепловые двигатели

01.02.06 – динамика, прочность машин и аппаратуры

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук



Москва – 2000

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана.

Научный руководитель	-	доктор технических наук, профессор Н.Д. Чайнов
Официальные оппоненты	-	доктор технических наук, профессор Романов К.И. кандидат технических наук, доцент Измайлов С.П.
Ведущее предприятие	-	ВНИИ МотоПром г. Серпухов

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1568948

Методика расчёта
Мягков П.П.

Защита диссертации состоится «11» декабря 2000 г. в
«14» часов на заседании диссертационного совета К 053.15.05 «Тепловые
машины и теоретические основы теплотехники» МГТУ им. Н.Э. Баумана по
адресу: 107005, Москва, Лефортовский район
«Энергомашиностроение», аудитория

С диссертацией можно ознакомиться
в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Отзывы на автореферат в два
экземпляра, просьба направлять по адресу:
107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5
секретариату совета К 053.15.05.

1568948

Автореферат разослан «10» _____

Учёный секретарь
диссертационного совета

к. т. н., доцент

Ефимов С.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Препятствием форсированию быстроходных двигателей в направлении увеличения числа оборотов коленчатого вала является повышение напряженности элементов конструкции двигателя. Особенно это касается высоконагруженных деталей движения, к которым относится шатун. Эта деталь во многом определяет прочностную надежность двигателей внутреннего сгорания (ДВС), подвергается высоким механическим нагрузкам: силам давления газов и инерции, которые в деталях кривошипно-шатунного механизма (КШМ) непосредственно зависят от массы поршня и шатуна, достигая в современных быстроходных двигателях достаточно больших значений. В связи с этим, в настоящее время особое внимание уделяется изучению возможностей применения новых альтернативных традиционным материалов, обладающих высокими удельными прочностными и жесткостными характеристиками при меньшей массе.

Применительно к шатуну среди таких материалов рассматриваются, в первую очередь, композиционные материалы (КМ), обладающие высокими удельными механическими характеристиками. Это позволяет рассчитывать на значительное снижение массы детали, а соответственно и нагрузок, действующих в деталях кривошипно-шатунного механизма.

К настоящему времени накоплен значительный отечественный и зарубежный опыт создания шатунов с применением композитов для мало-размерных быстроходных двигателей, поэтому разработка методики, позволяющей анализировать напряженное состояние детали и подбирать оптимальную структуру материала на стадии проектирования является своевременной и актуальной.

Диссертационная работа выполнялась в МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре "Поршневые двигатели".

Цель работы - разработка методики расчетного анализа напряженно-деформированного состояния шатунов из композиционных материалов для быстроходных двигателей с учетом особенностей строения и поведения композитов.

Методы исследования. Для расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) применялся метод конечных элементов (МКЭ). Получаемые в результате расчета напряжения используются для анализа состояния материала: составляющих его слоев и его структуры. Экспериментальные измерения деформированного состояния используются для уточнения граничных условий (ГУ), проверки правильности алгоритма анализа состояния материала и работоспособности крепежных элементов. Оптимизация структуры композита проводилась на основании анализа НДС детали и материала по разработанным алгоритмам.



Научная новизна. Предложена методика расчетного анализа напряженно-деформированного состояния шатунов из композиционных материалов, позволяющая на стадии проектирования учесть специфику композита - неоднородность и возможность управлять механическими свойствами материала.

Создана программа расчета прочностных свойств композита, основанная на гипотезе первого разрушения, и, позволяющая построить диаграммы деформирования материала

Разработаны алгоритм и программа оптимизации структуры слоистого композита, позволяющие подбирать структуру с лучшими свойствами под заданное напряженное состояние.

Практическая ценность. Создан комплекс программ, реализующий теоретические положения разработанной методики, для персональных ЭВМ, совместимых с IBM.

Предложены варианты структур материала, обеспечивающие более высокие прочностные характеристики композита и снижение напряженности детали в целом.

Проведено расчетно-экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния шатуна из слоистого композиционного материала двигателя типа Ч 7,6/7,1.

Реализация результатов работы. Основные результаты исследований использовались в госбюджетных и хозяйственных работах, выполненных в НИИ ЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана и в учебном процессе на кафедре "Поршневые двигатели" МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Апробация работы. Изложенный в диссертации материал доклады-вался и обсуждался на: заседаниях кафедры кафедры "Комбинированные двигатели внутреннего сгорания" МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1991-1994 гг., 52-й Научно-исследовательской конференции МАДИ (1994), на 25-м Международном научно-техническом совещании по проблемам прочности двигателей (1994), 4-th International Conference "ATA-MAT 94 STRUCTURAL MATERIALS AND PROCESSES FOR THE TRANSPORTATION INDUSTRY", Turin, 5-7 October, 1994; конференции, посвященной проблемам технологии двигателестроения ("Мотортехнология-94" Киев, октябрь 1994),

Публикации. Основные сведения, содержащиеся в диссертации, опубликованы в 5 печатных работах и 2 отчетах по научно-исследовательским темам, выполненных в рамках госбюджетных и хозяйственных работ в НИИ ЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, списка литературы, приложения. Работа содержит 122 страницы, в том числе 44 рисунка, 16 таблиц. Список литературы включает 101 наименование работ отечественных и зарубежных авторов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко охарактеризовано состояние проблемы в целом, а также показана ее актуальность. Сформулировано общее направление исследований.

В первой главе приводится определение композиционных материалов, представлен обзор и классификация композитов, отмечаются особенности композитов как конструкционных материалов, обоснована перспективность их применения в шатунах двигателей и выбор использованного материала в исследуемой, конструкции шатуна быстроходного двигателя. Проводится аналитический обзор различных конструкций шатунов, выполненных с применением КМ.

Основными преимуществами, которые привлекли внимание к композитам, являются их высокие удельные прочностные и жесткостные свойства, значительно превосходящие аналогичные показатели у традиционно применяемых сталей и алюминиевых сплавов, и возможность управлять этими свойствами таким образом, чтобы максимально использовать прочность и жесткость в наиболее нагруженных участках детали и наоборот снизить эти показатели там, где традиционный материал был бы "недогружен". В таблице 1 представлены свойства некоторых композитов. Работы по применению композитных технологий проводились большинством ведущих

Таблица 1

Сравнительные свойства некоторых композиционных материалов

Материал	ρ	E	μ	σ_b	$\bar{E}$	$\bar{\sigma}$
	г/см ³	ГПа		МПа	кМ	кМ
КМУ	1.5	125	0.29	1800	8300	120
сплав АЛ-30	2.8	70÷72	0.3	250÷300	2600	11
АЛ-30+15%Аl ₂ О ₃	2.9	100	0.3	500	3500	17.3
Д16+16%SiC	2.9	110	0.3	547	3800	19
Амг6+50%сталь (проволока 12Х18Н10Т $\sigma_t=4200$ МПа)	4.8	145	-	1600-1750	3100	36.5
Аl-сплав+50%B	2.7	235	-	1550	8800	57.5
Аl-сплав+12%Si+28%C	2.5	145	0.306	730	5800	30
АК-4	2.7	70	0.3	383	2600	14.2
АК-4.1	2.7	72	0.3	450	2670	16.7
Сталь 12ХН3А	7.8	200	0.3	930-1070	2600	13.8
Титан	4.5	110	0.33	900-1100	2500	2

автопроизводителей таких как Фольксваген, Рено, Ауди, Мерседес Бенц и др. При этом использовались как традиционный подход к конструированию (когда различные нагрузки, воспринимаемые деталью передаются на все ее элементы), так и принцип сеператности, когда различные нагрузки воспринимаются различными элементами. Такой подход применили, на-

пример, на Фольксвагене и Мерседес-Бенце. В их конструкциях головки шатуна и стержень соединены бандажом с некоторым преднатягом. Можно признать, что наибольшего успеха при создании композитного шатуна добились на Мерседес Бенце. Их конструкция имела на 42% меньшую массу по сравнению с применяемым стальным шатуном и выдержала 1236-ти часовые моторные испытания. Однако, такая конструкция имеет ряд существенных недостатков, среди которых сильное искривление волокон в бандаже, приводящее к значительному снижению прочности и усложненная технология изготовления.

Этих недостатков удается избежать при традиционном подходе к конструированию. В соответствии с ним был создан шатун из слоистого углепластика для быстроходного двигателя типа ВАЗ 2108 (4Ч 76/71). Применение слоистого композита основывалось на допущении о плоском напряженном состоянии детали. Данная конструкция имеет вдвое меньшую массу по сравнению со штатной и прошла 60 000 км на автомобиле ВАЗ 1111, доказав свою работоспособность.

Описанные особенности конструкции и материала потребовали разработки методики расчетного анализа НДС шатуна и материала для оптимизации его структуры.

К настоящему времени разработано достаточно большое количество аналитических и численных методов расчета НДС шатунов. Задаче аналитического определения НДС шатунов посвящены работы Р.С Кинасошвили, А.А. Попова, Ф.Ф. Симакова, Б.Л. Ромалиса, С.С. Носова, В.М. Тулякова, Я.В. Тихомирова. Обобщенная расчетная схема представляет собой статически неопределимый защемленный под углом α к оси шатуна круговой контур с радиусом R , постоянными моментом инерции и площадью поперечного сечения, на который действует внешняя нагрузка, распределенная на некотором угле ψ . Основными отличиями методик являются законы распределения нагрузки и определения угла заделки, с целью приближения расчетных результатов к экспериментальным.

К числу недостатков, присущих всем аналитическим схемам, относятся допущения о том, что стержень в месте сопряжения с головками является абсолютно жестким, несоответствие реальным условиям нагружения и невозможности учесть многие особенности конструкции. Кроме того, эти методики разработаны для изотропных материалов. Решение задачи определения НДС кругового бруса из материала с цилиндрической анизотропией дано С.Г. Лехнищким, тогда как в исследуемой конструкции используется ортотропный материал. При моделировании НДС шатунов, как и других деталей двигателя, представляется построение многоуровневой системы математических моделей, начиная с простейших одномерных и заканчивая объемными. Более точные результаты могут быть получены применением метода структурного элемента, предложенного М.А. Салтыковым. Суть этого метода в том, что исходный контур головок заменяется

стержневой системой в виде эквивалентной по жесткости полигональной рамы. Геометрические характеристики каждого стержня принимаются постоянными. Раскрытие статической неопределенности замкнутого контура осуществляется методом сил. Недостатком данного метода является сложность определения геометрических характеристик элементов схемы, деформации которых ограничиваются плоскостью движения шатуна.

В основу методики расчетного анализа НДС положен метод конечных элементов (МКЭ), который лишен указанных выше недостатков и позволяет достаточно точно описать геометрию детали в 3-мерной постановке.

На основании изложенного в работе были поставлены следующие задачи:

1. Разработка методики, алгоритма и программы расчета прочностных и жесткостных характеристик, применяемых в исследуемой конструкции шатуна, композиционных материалов;
2. Создание трехмерной модели шатуна из КМ быстроходного двигателя с целью более точного НДС;
3. Создание методики, алгоритма и программы для определения рациональной структуры композита по заданному напряженному состоянию;
4. Экспериментальное определение напряженно-деформированного состояния шатуна из композита и проверка расчетных характеристик детали.

Во второй главе изложена методика расчета жесткостных и прочностных свойств композита и анализа напряженно-деформированного состояния шатуна, а также оптимизации структуры композиционного материала.

В механике композитов для определения прочностных свойств однонаправленного композита используются следующие соотношения [Аболиньш]:

$$E_1 = [1 + (n - 1)\mu]E_m, \quad (1)$$

где: $n = E_B/E_m$; $\mu = F_B/F$;

E_B, E_m - модули упругости первого рода волокна и матрицы, соответственно;

μ - объемная доля волокна.

$$\nu_{12} = \nu_m(1 - \mu) + \mu\nu_B \quad (2)$$

где: ν_B, ν_m - коэффициенты Пуассона волокна и матрицы, соответственно.

$$E_2 = \frac{n[1 + (n - 1)\mu]E_m}{[\mu + n(1 - \mu)][1 + (n - 1)\mu] - (n\nu_m - \nu_B)^2\mu(1 - \mu)} \quad (3)$$

$$G_{12} = \frac{m(1 + \mu) - (1 - \mu)}{m(1 - \mu) + (1 + \mu)} G_m = \frac{[n(1 + \nu_m)(1 + \mu) + (1 + \nu_B)(1 - \mu)]E_m}{2(1 + \nu_m)[n(1 + \nu_m)(1 - \mu) + (1 + \nu_B)(1 - \mu)]} \quad (4)$$

$$\text{где: } m = \frac{G_B}{G_m} = \frac{n(1 + \nu_m)}{(1 + \nu_B)};$$

G_B, G_m - модули сдвига волокна и матрицы, соответственно.

Для инженерных расчетов эти формулы достаточно точны, но значения E_2, G_{12} целесообразно уточнять из эксперимента для соответствующего материала.

Для расчета эффективных упругих свойств композита состоящего из нескольких однонаправленных разноориентированных слоев использовался метод слоев, дающий хорошие результаты. Окончательно выражения для технических констант имеют вид:

$$E_x = \frac{\Delta_g}{g_{22}g_{66} - g_{26}^2}; \quad (5)$$

$$E_y = \frac{\Delta_g}{g_{11}g_{66} - g_{16}^2}; \quad (6)$$

$$G_x = \frac{\Delta_g}{g_{11}g_{22} - g_{12}^2}; \quad (7)$$

$$\nu_{xy} = \frac{g_{12}g_{66} - g_{16}g_{26}}{g_{22}g_{66} - g_{26}^2}; \quad (8)$$

Здесь $\Delta_g = \det [G]$.

В случае ортотропного композита ($g_{16}=g_{26}=0$) получим:

$$E_x = g_{11} - \frac{(g_{12})^2}{g_{22}}; \quad E_y = g_{22} - \frac{(g_{12})^2}{g_{11}}; \quad G_{xy} = g_{66}; \quad \nu_{xy} = \frac{g_{12}}{g_{22}}; \quad (9)$$

где: $[G_{xy}] = [T_1] [G_0] [T_1]^T$;

$$[G] = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{16} \\ g_{21} & g_{22} & g_{26} \\ g_{61} & g_{62} & g_{66} \end{bmatrix}; \quad [G_0] = \begin{bmatrix} g_{11}^0 & g_{12}^0 & 0 \\ g_{12}^0 & g_{22}^0 & 0 \\ 0 & 0 & g_{66}^0 \end{bmatrix}; \quad [T_1] = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & -2cs \\ s^2 & c^2 & 2cs \\ cs & -cs & c^2 - s^2 \end{bmatrix}; \quad (10)$$

$$g_i = \sum_{k=1}^n g_i^{(k)} h^{(k)}; \quad h^{(k)} - \text{относительная толщина } k\text{-го слоя}; \quad (11)$$

n - число слоев

$g_{11}^0 = E_1/(1 - \nu_{12}\nu_{21})$; $g_{12}^0 = E_1 \nu_{21}/(1 - \nu_{12}\nu_{21})$; $g_{22}^0 = E_2/(1 - \nu_{12}\nu_{21})$; $g_{66}^0 = G_{12}$

$s, c = \sin \alpha, \cos \alpha$; α - угол между осями анизотропии материала (x, y) и направлением осей анизотропии монослоев (1,2).

Для описания модели поведения монослоя в составе многослойного композита принимается гипотеза о независимости всех видов разрушения в слое, т.е. разрушение наступает, когда предельных значений достигают в отдельности напряжения $\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$. Т.о. условие прочности может быть записано [Алфутов, Зиновьев, Попов]:

$$\left. \begin{aligned} -F_{-1} &< \sigma_1 < F_{+1} \\ -F_{-2} &< \sigma_2 < F_{+2} \\ |\tau_{12}| &< F_{12} \end{aligned} \right\}$$

При создании алгоритма расчета прочностных свойств принимается, что однонаправленный материал в составе пакета деформируется в соответствии с модельными диаграммами (рис. 2). Как видно из диаграмм, кроме начального и конечного (материал разрушен) состояний монослоя, выделяется еще шесть промежуточных состояний, характеризующих материал с трещинами в матрице. Принимается, также, что связь слоев в пакете идеальна. Для реализации модели используется метод последовательных нагружений. Пусть на n -м шаге нагружения средние напряжения, приложенные к композиту, увеличиваются на величину шага по нагрузке $\Delta\{\sigma_{xy}\}_n = \{\Delta\sigma_x, \Delta\sigma_y, \Delta\tau_{xy}\}_n$.

Тогда соответствующие этому шагу приращения средних деформаций композита:

$$\Delta\{\varepsilon_{xy}\}_n = [G']_n^{-1} \Delta\{\sigma_{xy}\} \quad (12)$$

где матрица жесткости композита $[G']_n^{-1}$, была определена на предыдущем шаге нагружения по формуле (10).

Полные средние деформации материала после n -го шага нагружения становятся равными: $\{\varepsilon_{xy}\}_n = \{\varepsilon_{xy}\}_{n-1} + \Delta\{\varepsilon_{xy}\}_n$. Тогда соответствующие им деформации слоев в естественных осях ($1^{(i)}, 2^{(i)}$) можно найти из выражений: $\{\varepsilon_{12}\}_n^{(i)} = [T_1]_{n-1}^{(i)T} \{\varepsilon_{xy}\}_n$ и $\Delta\{\varepsilon_{12}\}_n^{(i)} = \{\varepsilon_{12}\}_n^{(i)} - \{\varepsilon_{12}\}_{n-1}^{(i)}$. Здесь матрица $[T_1]_{n-1}^{(i)}$ определена на предыдущем шаге нагружения по формуле (10).

Зная приращения деформаций в слоях можно определить приращение и полные напряжения в слоях:

$$\begin{aligned} \Delta\{\sigma_{12}\}_n^{(i)} &= [G^{01}]_{n-1}^{(i)} \Delta\{\varepsilon_{12}\}_n^{(i)}; \\ \{\sigma_{12}\}_n^{(i)} &= \{\sigma_{12}\}_{n-1}^{(i)} + \Delta\{\sigma_{12}\}_n^{(i)}. \end{aligned}$$

Т.о. найдены все параметры НДС слоев, необходимые для определения матрицы жесткости в соответствии с логикой модели, учитывающей промежуточные состояния слоев с трещинами в матрице.

Параметры эффективности жесткости слоев используем для формирования их матриц жесткости $[G^{01}]_n^{(i)}$ с учетом трещин в матрице.

Используя найденные матрицы жесткости слоев, вычислим уточненные (с индексом I) значения приращений и полные напряжения в слоях:

$$\begin{aligned} \Delta\{\sigma_{12}\}_{nI}^{(i)} &= [G^{01}]_{n-1}^{(i)} \Delta\{\varepsilon_{12}\}_n^{(i)}; \\ \{\sigma_{12}\}_{nI}^{(i)} &= \{\sigma_{12}\}_{n-1}^{(i)} + \Delta\{\sigma_{12}\}_{nI}^{(i)}. \end{aligned}$$

Относительно небольшая жесткость при сдвиге многих современных полимерных композитов может приводить к заметному изменению исходных углов укладки монослоев за счет деформаций сдвига. Этот вид нелинейностей, связанный с изменением геометрических параметров структуры многослойного композита, называют структурной нелинейно-

стью. Приближенный учет этого вида нелинейности может быть выполнен коррекцией углов укладки слоев следующим образом: $\varphi_n^{(i)} = \varphi_{n-1}^{(i)} + \Delta\gamma_{12n}^{(i)} / 2$.

Новые значения углов армирования $\varphi_n^{(i)}$ используем при определении матрицы преобразования координат $[T_1]_n^{(i)}$, необходимой при вычислении матрицы жесткости композита на n -м шаге нагружения:

$$[G']_n = \sum_{i=1}^N [T_1]_n^{(i)} [G^0]_n^{(i)} [T_1]_n^{(iT)} \bar{h}^{(i)}.$$

Зная уточненную матрицу жесткости на n -м шаге, можно определить значения средних напряжений в пакете слоев:

$$\{\sigma_{xy}\}_n = \sum_{i=1}^N [T_1]_n^{(i)} \{\sigma_{12}\}_n^{(i)} \bar{h}^{(i)}.$$

Уточненные значения напряжений $\{\sigma_{xy}\}_n$ в общем случае могут отличаться от уровня средних напряжений, равного произведению числа проведенных шагов на величину одного шага по нагрузке $n\Delta\{\sigma_{xy}\}$. Разность этих значений используется для контроля точности проведенных вычислений. Для этого пайдём модуль невязки (корень квадратный из суммы квадратов компонент $\epsilon = |\{\sigma_{xy}\}_n - n\Delta\{\sigma_{xy}\}|$) и отнесем его к модулю вектора приращения напряжений $\Delta\{\sigma_{xy}\}$. Нормированную невязку $\bar{\epsilon} = \epsilon / |\Delta\{\sigma_{xy}\}|$ сопоставим с заданной допускаемой погрешностью η . Если $\bar{\epsilon} > \eta$, возвратимся к (13) и повторим вычисления, используя матрицы, полученные в первом приближении на n -м шаге.

Если $\bar{\epsilon} > \eta$, считаем, что $\{\sigma_{xy}\}_n = n\Delta\{\sigma_{xy}\}$, и переходим к $(n+1)$ -му шагу нагружения.

Приращения напряжений ведется до разрушения композита. При этом считаем, что многослойный композит разрушен, если хотя бы в одном из слоев напряжения достигают предельных значений: $\sigma_1^{(i)} = F_1^{(i)}$ или $\sigma_1^{(i)} = F_1^{(i)}$, или $\sigma_2^{(i)} = F_2^{(i)}$.

Описанный алгоритм пошагового нагружения может быть использован для построения предельных поверхностей (выход за которые означает разрушение или изменение состояния слоев) композита в пространстве напряжений $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy})$. Для этого задается необходимое число лучей нагружения. Угловое расстояние между лучами нагружения равно $2\pi/N$. Если задан шаг приращения напряжений $|\Delta\sigma_{xy}|$, то компоненты вектора приращения напряжений для j -го луча (для плоскости (σ_x, σ_y)) определяются следующим образом:

$$\begin{Bmatrix} \Delta\sigma_x \\ \Delta\sigma_y \\ \Delta\tau_{xy} \end{Bmatrix} = |\Delta\sigma_{xy}| \begin{Bmatrix} \cos 2\pi / N \\ \sin 2\pi / N \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Последовательно решая N задач, каждой из которых соответствует свой шаг $\Delta\{\sigma_{xy}\}_j$, фиксируя этапы смены состояний отдельных слоев, мож-

но построить линии предельных состояний композита на плоскости (σ_x , σ_y).

Следующим этапом при разработке методики был поиск оптимальной структуры композита. В общем виде формулировка задач оптимального проектирования может быть записана в виде:

$$\begin{aligned} \Pi_{\text{opt}}: F(\Pi_{\text{opt}}) &\rightarrow \text{extr}; \\ f_i(\Pi) &> f; i=1, n; \\ \varphi_i(\Pi) &> 0; i=1, n. \end{aligned} \quad (13)$$

Здесь: F - критерий оптимальности (целевая функция); Π - точка в пространстве проектирования, координаты которой указывают на положение данной конструкции в пространстве проектирования и определяют ее через геометрию и характеристики материалов. При оптимизации многослойного композита координатами точки Π будут, в частности, толщины (числа элементарных монослоев), углы ориентации отдельных слоев пакета, а также тип и объемные доли компонент, составляющих композит. Равенство и неравенство в (13) определяются ограничениями на поведение конструкции под нагрузкой и характеристиками материала, вытекающими из технологии. Учитывая, что применяемый для изготовления шатуна материал является нетрадиционным, было предложено применить метод циклического покоординатного спуска, который относится к методам нулевого порядка, имеет простой алгоритм, не требует больших затрат на подготовку задачи к решению. Кроме того, в процессе расчета может быть прослежено изменение свойств от структуры материала.

В данном алгоритме в качестве критерия оптимальности было решено использовать коэффициенты запаса прочности в соответствующих направлениях анизотропии материала. В общем виде данная задача представляет собой задачу параметрического проектирования на наихудший случай, т.е. проводится поиск такой структуры композита, которая обеспечивала бы максимум минимального коэффициента запаса прочности детали. Поэтому общий алгоритм поиска оптимальной структуры может быть описан следующим образом:

1. Расчет напряженного состояния шатуна по МКЭ;
2. Определение минимального коэффициента запаса и послойный анализ напряженного состояния слоев в составе пакета;
3. Изменение структуры пакета; вычисление свойств материала. Если полученные свойства не выходят за рамки ограничений, то проводится вычисление целевой функции. При ее улучшении расчет по данному направлению продолжается. Если свойства композита выходят из ограничений или ухудшается значение целевой функции, то направление поиска меняется на противоположное. Если и в этом случае улучшения не происходит, то шаг изменения параметра уменьшается.

Если полученная структура обеспечивает улучшение целевой функции, то происходит возврат к 1-му этапу - вычислению напряженного состояния

В третье главе приводится описание экспериментальной установки, методика тензометрирования. В ходе эксперимента проводилось измерение деформаций шатуна и соединительных скоб с целью уточнения граничных условий и разработки по их усовершенствованию.

В качестве нагружающего устройства использовалась универсальная испытательная машина 1958 У10-1, позволяющая развивать максимальную нагрузку 100кН. Эксперимент выполнялся в два этапа: тарировка тензорезисторов на специально изготовленном образце и исследование деформированного состояния шатуна. Контрольно-измерительная аппаратура - СИИТ-3. Данная система позволяет подключать до ста каналов. Быстродействие системы - до 20 измерений/с.

Для тарировки тензодатчиков был подготовлен специальный образец, который изготавливался из штатного шатуна с помощью механической обработки.

Измерение деформаций проводилось тензорезисторами типа КФ5 с базой 1 мм. Наклеивание датчиков производилось клеем циакрин.

Тарировка производилась с помощью навесного тензометра, входящего в комплект машины 1958 У10-1. Для исключения влияния перекосов, вызванных неточностью установки образца в захватах машины, измеритель деформаций поочередно располагали на противоположных сторонах образца. Одновременно с тарировкой был определен продольный модуль упругости E_x . Его величина составила 93,1 ГПа, тогда как расчетное значение составляет 92,9 ГПа.

Исследование напряженно-деформированного состояния шатуна проводилось в два этапа: определение усилия затяжки соединительных скоб и исследование деформированного состояния шатуна. Экспериментально определенные усилия затяжки скоб затем использовались для уточнения граничных условий при расчете НДС шатуна.

Определение деформаций скоб проводилось при помощи тензорезисторов типа КФ5 с базой 1 мм. Затяжка шатунного болта производилась динамометрическим ключом моментом 30 Нм. В результате было определено, что среднее напряжение в скобе составляет 540 МПа. В дальнейшем эта величина использовалась в качестве ГУ при расчете НДС шатуна. Одновременно было выявлено, что используемые болты М8 не выдерживают нагрузки, в связи с чем было предложено применять болты М9.

Для исследования деформированного состояния на натурный шатун было наклеено 52 тензорезистора типа КФ5 с базой 1 мм, наклейка производилась клеем циакрин. Для удобства сравнения полученных значений с расчетными датчики были расположены в двух взаимно перпендикулярных направлениях: вдоль продольной оси шатуна и перпендикулярно ей. Результаты тензометрирования показали хорошее соответствие с данными расчета.

В четвертой главе проведен расчет НДС шатуна, анализ состояния материала и оптимизация его структуры.

Для более полного учета геометрии и условий нагружения была разработана 3-мерная КЭ модель, включавшая: вкладыш, поршневой палец, стальную втулку поршневого пальца, верхнюю и нижнюю бобышки шатуна и стержень. При этом принимались следующие допущения:

- не учитывается изгибающий момент в плоскости качания шатуна.
- контакты между элементами шатуна из разнородных материалов (втулка-шатун, втулка-палец и вкладыш-шатун) принимались идеальными.

Расчетная схема шатуна представлена на рис. 3. Расчет производился на действие максимальных растягивающей и суммарной сжимающей нагрузок. Напряжения запрессовки вкладыша и пальца моделировалось их нагревом. Эквивалентная температура нагрева, обеспечивающая необходимые деформации пальца и вкладыша составили: для поршневого пальца- 140°C ; для вкладыша- 85°C . При задании основной нагрузки (растяжения-сжатия), воспринимаемой шатуном, принималось, что она распределяется по поверхности вкладыша в соответствии с законом косинуса:

$$q(v) = q_0 \cos \frac{\pi}{2v_0} v$$

$$q_0 = \frac{R_p}{r_2} \frac{\pi^2 - 4v_0^2}{4\pi v_0 \cos v_0}$$

где: v_0 - угол охвата вычисляется по эмпирической зависимости, учитывающей влияние слоя смазки в подшипнике на распределение нагрузки:

$$v_0 = 1.5 \sqrt[3]{\frac{R_p}{bK\delta_2}} (1.206 - 0.264 \sqrt[3]{\frac{R_p}{bK\delta_2}})$$

b - ширина вкладыша (подшипника)

K - контактная жесткость пары вал-вкладыш подшипника в головке шатуна;

δ - начальный радиальный зазор в подшипнике;

r_2 - радиус рабочей поверхности подшипника;

R_p - вектор нагрузки, действующей на подшипник.

В расчете учитывались 3 материала: материал поршневого пальца, втулки и вкладыша - сталь 12ХН; материал бобышки шатуна- полиимидная матрица произвольно армированная короткими углеродными волокнами (изотропный); материал шатуна - КМУ-8, представляющий собой пакет однонаправленных слоев из углеродных волокон, ориентированных под различными углами к продольной оси шатуна, и полиимидной матрицы. Исходная структура пакета: 0° ; $\pm 45^{\circ}$; 90° . В результате расчета были получены диаграммы деформирования и предельная поверхность исходного композита (рис.4).

Произведенный расчет НДС позволил выявить наиболее опасные зоны детали. Они находятся в нижней части крышки шатуна и на ее внешней поверхности. При этом минимальный коэффициент запаса достигается в

этой зоне при растяжении вдоль оси ОУ (максимальные напряжения достигают значения $(\sigma, \approx 46 \text{ МПа})$. Минимальный коэффициент запаса прочности достигается в этой зоне при растяжении вдоль поперечной оси шатуна и имеет значение $n_s^0=1.55$. Лимитирующим оказывается слой с расположением волокон вдоль продольной оси шатуна, который подвергается растягивающей нагрузке поперек волокон.

Распределение напряжений в детали под действием растягивающей и сжимающей нагрузок показано на рис. 5, 6.

На основании рассчитанного в напряженном состоянии (НС) шатуна было проведено исследование НС каждого из слоев пакета, которое позволило подобрать оптимальную, с точки зрения напряженности слоев и всей детали, структуру. Для этого использовался алгоритм, описанный в главе 2. При этом было предложено два варианта: 1- использовать в конструкции шатуна два материала разных структур (один для применения в стержне и верхней головке, другой - в крышке шатуна); 2 - использовать в конструкции шатуна четыре материала различных структур (1-й в поршневой головке, 2-й в стержне шатуна, 3-й в шатунной части кривошипной головки, 4-й в крышке шатуна). Проведенный поверочный расчет шатуна из полученных материалов показал, что лимитирующими в 1-м случае оказываются касательные напряжения, минимальный коэффициент запаса составляет 2.42 и имеет место в зоне перехода от стержня шатуна к кривошипной головке шатуна

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Проведенные теоретические и расчетно-экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Разработана методика прочностного анализа шатуна из композиционного материала для быстроходного двигателя типа ВА3-2108 (4Ч76/71, $N_e=47.4 \text{ кВт}$, $n_e=5600 \text{ мин}^{-1}$).

2. Разработана 3-х- мерная конечно-элементная модель композитного шатуна, включающая: поршневой палец, втулку поршневого пальца, вкладыш, верхнюю и нижнюю бобышки головок шатуна, которые представлены в расчетной модели тремя материалами.

3. Проведено расчетное исследование шатуна из слоистого композита на режимах максимального крутящего момента и повышенной частоты вращения ($1.1n_e=6200 \text{ мин}^{-1}$). Выявлены значительные различия напряженного состояния на внешней и срединной поверхностях и по толщине и, следовательно, некоторое отличие НДС от плоского. Наиболее опасные зоны, расположены на внешней поверхности нижней части крышки шатуна. Максимальные напряжения составили $\approx 46 \text{ МПа}$.

4. Проведенный послойный анализ напряженного состояния материала в выявленной опасной зоне показал, что наиболее нагруженными являются слои с ориентацией вдоль оси шатуна при растяжении в поперечном направлении. Коэффициент запаса прочности при этом составил 1.65.

С учетом усталостного характера нагружения коэффициент запаса по усталостной прочности составляет ≈ 1 .

5. Для выравнивания напряженного состояния слоев проведена оптимизация структуры материала. В результате предложена структура с ориентацией волокон $0^\circ - \pm 12.9^\circ - 90^\circ$. При этом увеличивается прочность материала в поперечном направлении, что повышает статическую и усталостную расчетную прочность шатуна в ~ 1.5 раза.

6. Создана экспериментальная установка для статического тензометрирования шатунов из композитов. Проведенное экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния исходной конструкции шатуна подтвердило надежность расчетного определения параметров НДС детали и разработанной математической модели.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Чайнов Н.Д., Краснокутский А.Н., Мягков Л.Л. Математическая модель анализа напряженно-деформированного состояния шатунов быстроходных автомобильных двигателей при использовании волокнистых композиционных материалов.//Тезисы докладов 52-й Научно-методической и Научно-исследовательской конференции.- М.,1994.

2. Математическая модель анализа напряженно-деформированного состояния шатуна быстроходного двигателя из волокнистого композита / Краснокутский А.Н., Мягков Л.Л., Чайнов Н.Д. // Тезисы докладов XXV Международного Научно-Технического Совещания по Проблемам Прочности Двигателей.-М., 1994.

3. Chainov N.D., Myagkov L.L., Panin V.I., Udovichenko V.B., Design, Calculation and Testing of Composite Connecting Rod for Internal Combustion Engine. - Proceedings of the 4th International Conference ATAMAT 94 "Structural Materials and Processes for the Transportation Industry", October 5-7, 1994, Torino (Italy), Pag. 327, 13 pagg., 6 figg., 7 cit bibl.

4. Мягков Л.Л., Панин В.И., Чайнов Н.Д. Математическая модель анализа напряженно-деформированного состояния шатуна быстроходного двигателя из волокнистого композита // Тезисы докладов Международной Научно-Технической Конференции Мотортехнология.- Киев, 1994.

5. Мягков Л.Л. Методика расчетного анализа напряженно-деформированного состояния шатунов из композиционных материалов для двигателей внутреннего сгорания. // Молодежь и наука-третье тысячелетие: Труды международного конгресса - М., 1997 г. - Т.2.- С. 57.-(Сер. Профессионал).

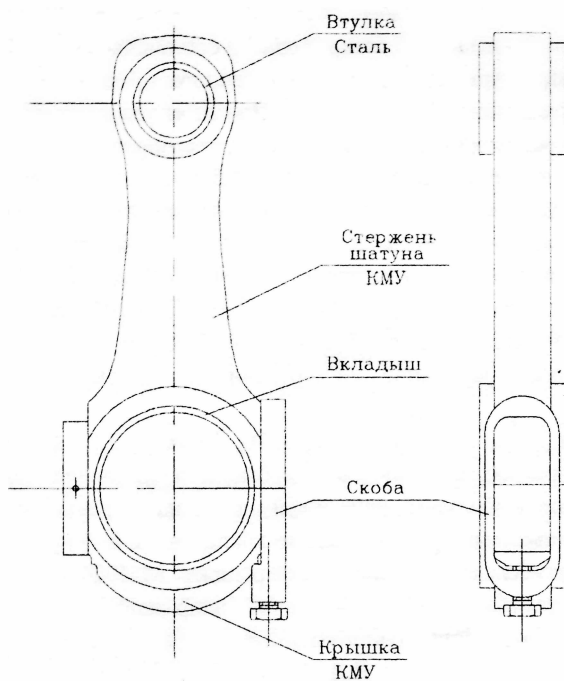


Рис. 1. Конструкция исследуемого шатуна

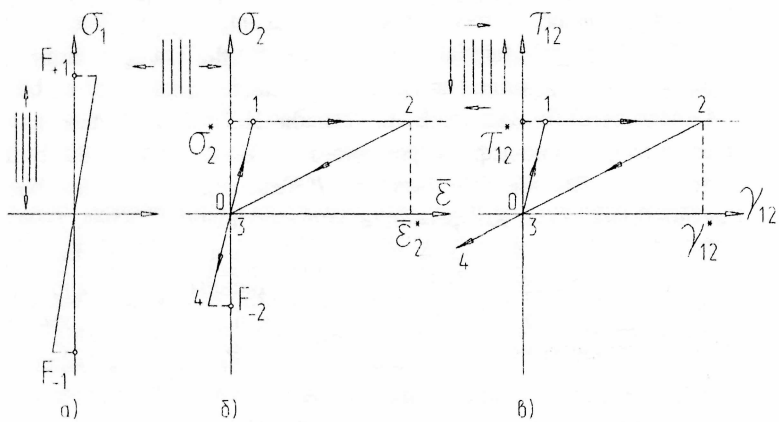


Рис. 2. Модельные диаграммы

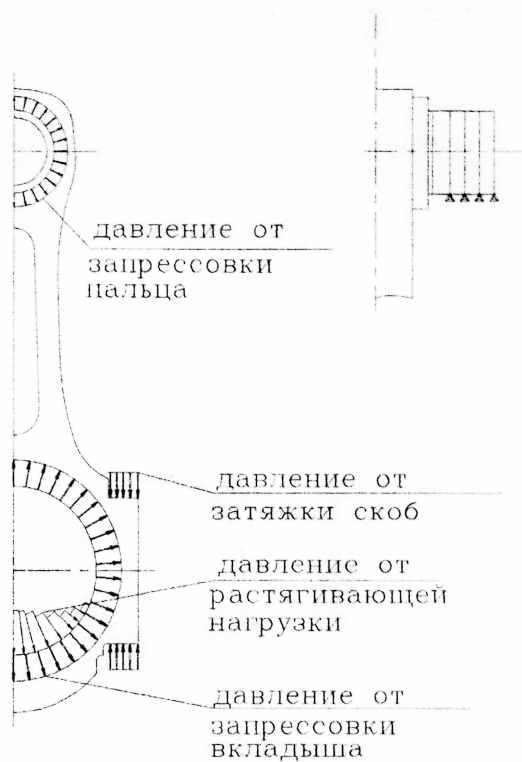


Рис. 3. Расчетная схема шатуна

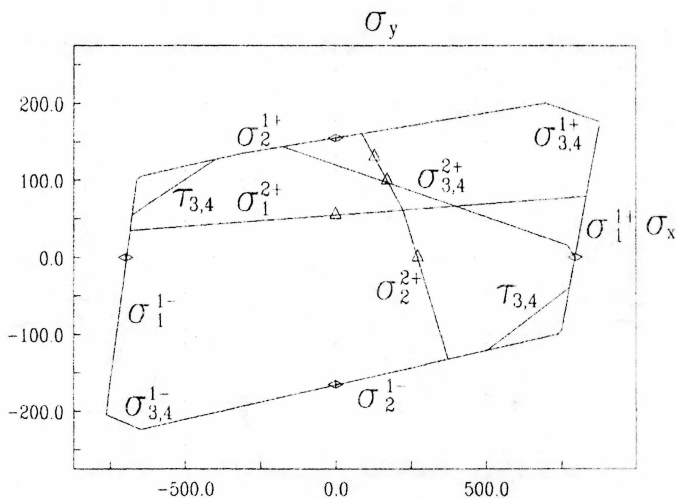


Рис. 4. Предельная поверхность исходного композита

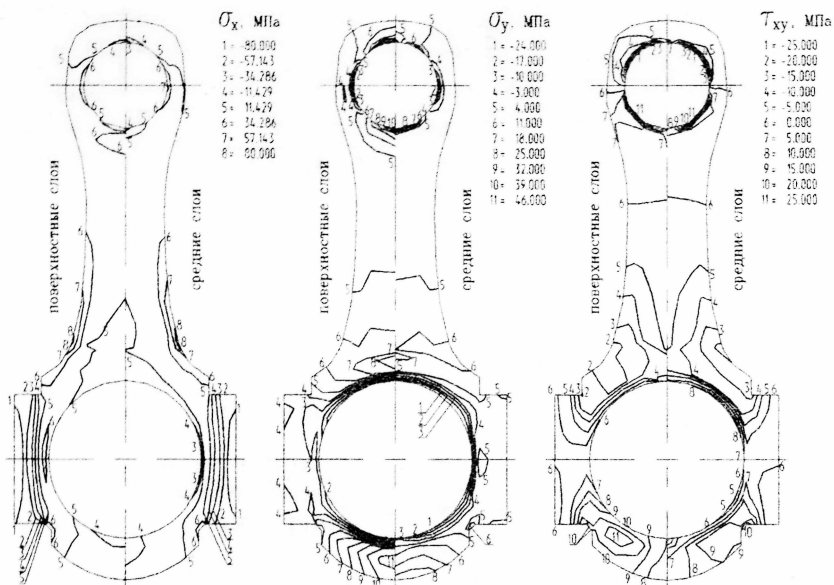


Рис. 5. Распределение напряжений в шатуне от растягивающей нагрузки

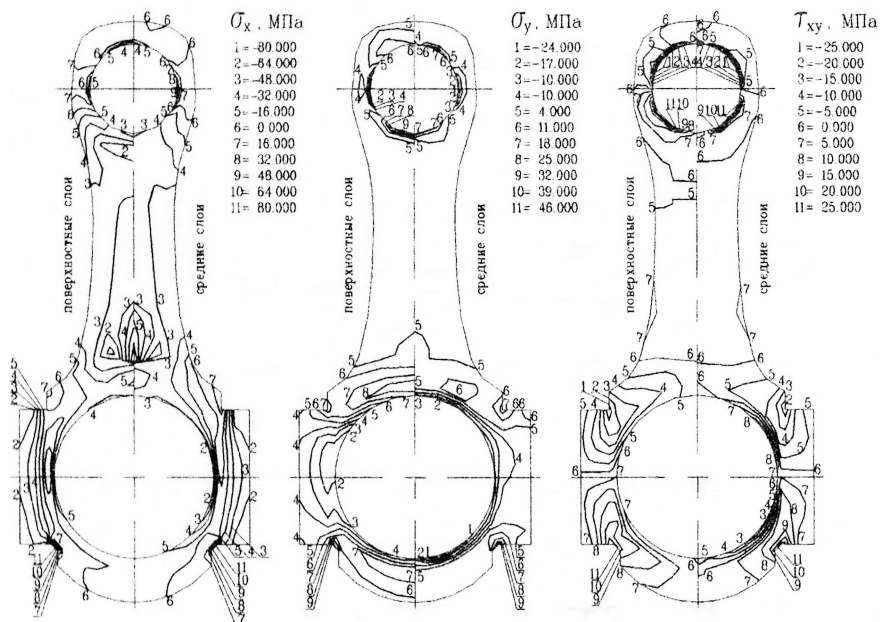


Рис. 6. Распределение напряжений в шатуне от сжимающей нагрузки

Зак 13 Тираж 100 экз Объем 1 п. л.
Подписано к печати 8.11.2000г.

Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана