

УДК 539.389

О ЦИКЛИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ ОБОЛОЧКИ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ МНОГОКРАТНОГО ДЕЙСТВИЯ

© 2022 г. В. С. Зарубин^{a,*}, В. Н. Зимин^{a,**}

^a *Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет) Москва, Россия*

**e-mail: fn2@bmsu.ru*

***e-mail: zimmin@bmsu.ru*

Поступила в редакцию 04.03.2021 г.

После доработки 19.03.2021 г.

Принята к публикации 15.04.2021 г.

При построении математической модели, описывающей неупругое неизотермическое деформирование внутренней стенки цилиндрической оболочки камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя (ЖРД), использована упрощенная расчетная схема одномерного напряженно-деформированного состояния (НДС) биметаллической оболочки. Проведен анализ изменения напряжений и деформаций во внутренней и наружной стенках оболочки в периоды пуска, работы, останова и паузы между пусками ЖРД многократного действия. Для описания неупругого деформирования внутренней стенки применен механический аналог, позволяющий описать неизотермические процессы пластичности и ползучести. Приведен пример расчета НДС оболочки, позволяющего оценить накопление абсолютного значения неупругой деформации в материале внутренней стенки, влияющей на повреждаемость ее материала.

Ключевые слова: биметаллическая оболочка, неизотермическая неупругая деформация, кратковременная ползучесть

DOI: 10.31857/S0572329922010123

Введение. Оболочка камеры сгорания современных ЖРД является одним из наиболее теплонапряженных элементов конструкции двигателя. Высокие значения давления и температуры газа в камере сгорания приводят к необходимости охлаждения ее оболочки [1]. Охлаждающий тракт оболочки образован зазором между ее внутренней и наружной стенками, скрепленными между собой диффузионной пайкой по вершинам фрезерованных ребер (рис. 1) [2]. Контактующая с высокотемпературными продуктами сгорания внутренняя стенка подвержена интенсивному нагреву, а наружная стенка выполняет роль силового элемента оболочки. Различие функций стенок оболочки приводит к необходимости их изготовления из разных материалов с существенно различными теплофизическими и механическими характеристиками. Для наружной стенки используют высокопрочные нержавеющие стали, а материалом внутренней стенки служат высокотеплопроводные сплавы на основе меди [2]. При работе ЖРД в силу большой разности температурных деформаций стенок такой биметаллической оболочки материал внутренней стенки подвергается неупругому неизотермическому деформированию (как пластическому, так и развивающейся во времени ползучести [3]), тогда как материал наружной стенки обычно сохраняет свойство упругости.

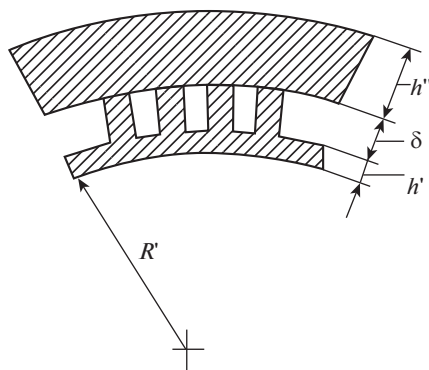


Рис. 1. Фрагмент поперечного сечения цилиндрической биметаллической оболочки.

Циклическая последовательность этапов нагружения оболочки камеры сгорания ЖРД многократного действия приводит к накоплению связанных с малоцикловой усталостью [4, 5] повреждений в материале внутренней стенки и вызвать ее разрушение и/или утрату герметичности охлаждающего тракта. Основным параметром, определяющим уровень малоцикловой усталости и характеризующим остаточный ресурс биметаллической оболочки, является абсолютное значение накопленной неупругой деформации. Для количественной оценки этого параметра необходим анализ нагружения биметаллической оболочки при многократных пусках и выключениях ЖРД. В данной работе при определенных упрощающих допущениях проведен приближенный анализ такого нагружения.

1. Упрощенная расчетная схема биметаллической оболочки. Одна из первых работ по анализу НДС оболочки камеры сгорания ЖРД принадлежит В.И. Феодосьеву [6]. В этой работе для предварительного анализа предложена упрощенная расчетная схема оболочки, учитывающая во внутренней и наружной стенках толщиной h' и h'' лишь окружные напряжения σ' и σ'' (здесь и в дальнейшем символы с одним штрихом отнесены к внутренней стенке, а с двумя штрихами – к наружной). Это позволяет рассматривать только поперечное сечение оболочки (см. рис. 1) без учета условий ее нагружения в направлении оси камеры сгорания.

Во время работы ЖРД из условия равновесия фрагмента оболочки в окружном направлении следует соотношение [3, 6]

$$\sigma' h' + \sigma'' h'' = p_g R' + p_f \delta \quad (1.1)$$

где p_g и p_f – давления газа в камере сгорания и компонента топлива в охлаждающем тракте соответственно, R' – радиус внутренней поверхности оболочки, δ – высота ребер. Ребра приняты абсолютно жесткими в радиальном направлении и достаточно часто расположенными.

Суммарная толщина $h = h' + \delta + h''$ оболочки (см. рис. 1) для двигателей с достаточно большой силой тяги мала по сравнению с ее средним радиусом $R = R' + h/2$, к которому можно отнести перемещения стенок в окружном направлении. Тогда полные деформации стенок в окружном направлении, включающие механические ε и температурные ε_T составляющие, будут одинаковы, а условие совместности деформации примет вид [5]

$$\varepsilon' + \varepsilon'_T = \varepsilon'' + \varepsilon''_T \quad (1.2)$$

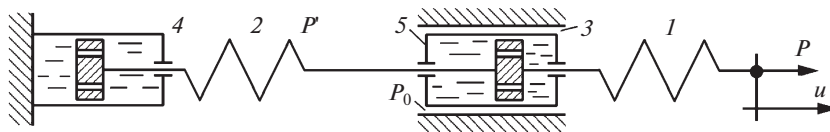


Рис. 2. Схема механического аналога.

Отсчет температурных деформаций происходит от состояния оболочки перед пуском двигателя, когда значения средних температур T' и T'' стенок одинаковы и равны T_0 .

Представленные соотношения необходимо дополнить математической моделью, описывающей связь напряжения и деформации материала каждой стенки оболочки в неизотермических условиях.

2. Модель неупругого деформирования материалов оболочки. Для используемых в конструкции рассматриваемой оболочки материалов допустимо считать, что при растяжении и сжатии связь между абсолютными значениями напряжения и деформации одинакова. Поэтому для построения модели деформирования таких материалов при одноосном нагружении необходима лишь совокупность диаграмм растяжения образцов этого материала при фиксированных значениях температуры и зависимости от времени деформации ползучести этих образцов при фиксированных значениях температуры и напряжения. Следует отметить, что учет процесса ползучести необходим лишь для материала внутренней стенки в период работы ЖРД, длительность которого имеет порядок 10^3 с. В этом случае принято говорить о кратковременной ползучести [7].

Определяемая диаграммой растяжения связь напряжения σ и деформации ϵ при фиксированной температуре T можно аппроксимировать объединением линейного участка упругого деформирования и участка пластического деформирования, описываемого степенной зависимостью [4]. Для линейного участка будет справедливо равенство $\sigma(T, \epsilon) = E(T)\epsilon$, где $E(T)$ – зависящий от температуры модуль упругости (модуль Юнга). Это равенство применимо при $\sigma \in [-\sigma_0(T); \sigma_0(T)]$ и $\epsilon \in [-\epsilon_0(T); \epsilon_0(T)]$, где $\sigma_0(T)$ – зависящий от температуры предел пропорциональности и $\epsilon_0(T) = \sigma_0(T)/E(T)$. Степенная зависимость при $|\sigma| \geq \sigma_0(T)$ имеет вид

$$\sigma_h(T, \epsilon) = \sigma_0(T)(|\epsilon|/\epsilon_0(T))^{m(T)}\epsilon/|\epsilon| \tag{2.1}$$

где $m(T) \in [0; 1)$ – зависящий от температуры показатель степени. Тогда модуль упрочнения при пластическом деформировании материала будет равен

$$E_h(T, \epsilon) = \partial\sigma_h(T, \epsilon)/\partial\epsilon = \sigma_0(T)m(T)(|\epsilon|/\epsilon_0(T))^{m(T)-1}/\epsilon_0(T)$$

Для описания неизотермического неупругого деформирования материала внутренней стенки оболочки с учетом ползучести целесообразно применить механический аналог (рис. 2). Аналог построен на основе физических представлений о микроструктуре поликристаллических конструкционных материалов и микромеханизме процесса их деформирования в сочетании с известными положениями феноменологических теорий пластичности и ползучести [8].

Сила P на рис. 2 пропорциональна напряжению σ при одноосном нагружении материала, а перемещение точки приложения этой силы пропорционально деформации ϵ . При фиксированном значении температуры жесткость пружины l постоянна и пропорциональна модулю упругости $E(T)$ моделируемого материала, а жесткость пружины 2 пропорциональна модулю упрочнения $E_h(T, \epsilon_h)$ этого материала при пластическом деформировании. Сила P_0 при движении элемента сухого трения 3 относительно

направляющих пропорциональна пределу пропорциональности $\sigma_0(T)$ материала. При $|P| > P_0$ в затвердевшей жидкости в элементах 4 и 5 вязкого трения возникает мгновенное перемещение этого элемента и растяжение или сжатие пружины 2, пропорциональное мгновенной пластической деформации.

После обнуления силы P аналог моделирует разгрузку материала. Если при нагружении было выполнено неравенство $|P| \leq 2P_0$, то разгрузка происходит при упругой деформации, а возникшее натяжение пружины 2 сохранится и будет пропорционально пластическому упрочнению моделируемого материала. Неравенство $|P| > 2P_0$ соответствует случаю, когда после обнуления силы P , с учетом идеального эффекта Баушингера на завершающем этапе разгрузки в материале возникает мгновенная пластическая деформация обратного знака. Если материал обладает изотропным упрочнением [9, 10], то в аналоге сила трения P_0 будет зависеть от абсолютного значения накопленной пластической деформации. При наличии на диаграмме моделируемого материала так называемого “зуба текучести”, вызванного наличием перед началом движения дислокаций в плоскостях скольжения предварительного этапа их освобождения из “облаков” примесей [8, 11], для элемента 3 следует ввести силу трения покоя P_0^0 . В случае неизотермического пластического деформирования материала параметры аналога будут зависеть от температуры.

При конечной вязкости жидкости в элементе 4 вязкого трения аналог моделирует снятие упрочнения материала, вызванного пластическим деформированием. Перемещение поршня в элементе 5 при конечной вязкости жидкости позволяет моделировать процесс ползучести материала. Фиксированному значению температуры материала соответствуют постоянные значения вязкости в элементах 4 и 5. При одновременном функционировании этих элементов происходит выравнивание скоростей движения поршней относительно стенок цилиндров, что моделирует процесс перехода стадии неустановившейся ползучести материала в стадию установившейся ползучести с постоянной скоростью $\dot{\epsilon}_c = \text{const}$, соответствующей фиксированным значениям температуры T и напряжения σ .

Скорости перемещения поршней в элементах 4 и 5 механического аналога нелинейно зависят от действующих на поршни сил. При моделировании установившейся стадии ползучести эти скорости должны быть постоянны, что позволяет для моделируемого материала использовать соотношения, описывающие термически активируемые процессы движения дислокаций в кристаллических зернах поликристаллов [8]. Для постоянной скорости деформации ползучести можно записать

$$\dot{\epsilon}_c = A(T) \text{sh}(B(T)(\sigma - \sigma_m)/\sigma_0(T)) = \text{const} \quad (2.2)$$

где функции $A(T)$ и $B(T)$ определяют влияние температуры, а параметр σ_m характеризует уровень микронапряжений в материале и в аналоге соответствует силе, действующей на поршень в элементе 4.

Структура соотношения (2.2) может быть использована и для описания неустановившейся стадии ползучести, если заменить параметр σ_m функцией $\sigma_m(t)$ времени t . Скорость изменения этой функции можно представить в виде [8]

$$\dot{\sigma}_m(t) = E_h(T, \epsilon)(\dot{\epsilon}_c - A_h(T) \text{sh}(B_h(T) \sigma_m(t)/\sigma_0(T))) \quad (2.3)$$

Здесь функции $A_h(T)$ и $B_h(T)$ также определяют влияние температуры и вместе с функциями $A(T)$ и $B(T)$ их следует определять обработкой экспериментальных данных. Для сплавов на основе меди, применяемых для внутренней стенки оболочки камеры ЖРД в интервале температур 600...1000 К, можно принять [8] $A(T) = A_h(T) = \exp(T/40 + 10600/T - 46.4)$ 1/с и $B(T) = B_h(T) = 7.5$.

Таблица 1. Параметры аппроксимации диаграмм растяжения материалов стенок

Параметр	T	E	σ_0	ε_0	m
Внутренняя стенка	293	143700	41	0.000285	0.293
	873	115300	82	0.000711	0.054
Наружная стенка	293	197200	844	0.000428	0.110
	400	192000	828	0.000431	0.115

Для материала с изотропным упрочнением сила трения P_0 в элементе Z аналога будет зависеть от абсолютных значений накопленной материалом деформации не только при пластическом деформировании, но и в процессе ползучести. Взаимодействие элементов представленного механического аналога позволяет применить соотношения вида (2.1) и (2.2) для описания процесса ползучести материала и в случае изменения во времени как температуры T , так и напряжения σ . Тогда в этих соотношениях скорость $\dot{\varepsilon}_c$ деформации ползучести также станет функцией времени.

3. Последовательность нагружения оболочки. Этапы нагружения оболочки камеры сгорания ЖРД в пределах одного цикла целесообразно рассмотреть на конкретном примере, используя соотношения, описывающие поведение механического аналога. Пусть $R' = 0.15$ м, $h' = 0.001$ м, $h'' = 0.007$ м, $\delta = 0.004$ м, т.е. $R = 0.156$ м. Перед пуском двигателя $T' = T'' = T_0 = 293$ К, на его рабочем режиме с длительностью 200 с $T' = 873$ К, $T'' = 400$ К, $p_g = 20$ МПа, $p_f = 35$ МПа. Этапы останова двигателя включают практически мгновенный сброс давления ($p_g = 0$) и сравнительно короткий период охлаждения оболочки при $p_f > 0$. Внутренняя стенка оболочки выполнена из бронзы марки БрХ08, а наружная стенка – из хромоникелевой стали 07Х16Н6Т. Для этих материалов средние значения коэффициента линейного теплового расширения соответственно $\alpha' = 17 \times 10^{-6}$ 1/К в интервале температур $T_0 \dots T'$ и $\alpha'' = 16 \times 10^{-6}$ 1/К в интервале температур $T_0 \dots T''$. Следовательно, температурные деформации стенок оболочки на рабочем режиме будут равны $\varepsilon_T' = 0.0102$ и $\varepsilon_T'' = 0.001712$.

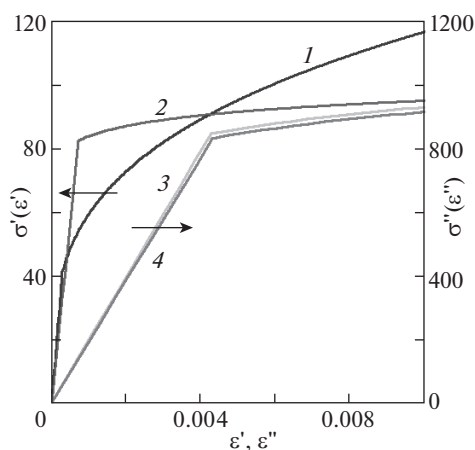
**Рис. 3.** Диаграммы растяжения материалов стенок.

Таблица 2. Напряжения и деформации в характерных точках траекторий нагружения

Номер точки	1	2	3	4	5
T'	873	873	873	293	873
ε'	-0.005743	-0.005811	-0.007980	-0.000073	-0.005788
σ'	-91.79	-0.7062	-87.09	100.47	-31.35
T''	400	400	400	293	400
ε''	0.002405	0.002337	0.000168	-0.000073	0.002360
σ''	461.68	448.67	32.26	-14.36	453.04

На рис. 3 представлены аппроксимации диаграмм растяжения материалов стенок при начальной температуре T_0 (кривые 1 для внутренней и 3 для наружной стенки) и температурах T' (2 для внутренней стенки) и T'' (4 для наружной стенки), построенные по данным работы [4]. Стрелками на рисунке указаны соответствующие кривым оси ординат. Использованные при построении значения параметров приведены в табл. 1.

Из предварительных оценок следует, что при указанных исходных данных на всех этапах нагружения оболочка материала наружной стенки сохраняет свойство упругости, а в материале внутренней стенки возникают неупругие деформации. Этапы пуска и останова двигателя достаточно кратковременны, что позволяет на этих этапах пренебречь накоплением деформации ползучести. В предположении отсутствия начальных деформаций стенок оболочки деформацию ε' внутренней стенки при завершении первого пуска двигателя будет определять равенство

$$\sigma'_0(T'')h'(|\varepsilon'|/\varepsilon'_0(T''))^{m'(T'')}|\varepsilon'| + E''(T'')h''(\varepsilon' + \varepsilon'_T - \varepsilon''_T) = p_g R' + p_f \delta \quad (3.1)$$

которое следует из формул (1.1), (1.2) и (2.1). На последующих этапах нагружения оболочки при отсутствии ползучести необходимо в равенстве (3.1) учесть значения деформации и напряжения внутренней стенки в начале каждого этапа и соответствующие этому этапу значения p_g и p_f .

На этапе установившегося режима работы двигателя при $T' = \text{const}$ и $T'' = \text{const}$ ползучесть материала внутренней стенки приводит к релаксации напряжения $\sigma'(t)$ путем изменения упругой составляющей $\sigma'(t)/E'(T')$ деформации. Из условия (1.1) равновесия при $p_g = \text{const}$ и $p_f = \text{const}$ следует $d\sigma'(t)/dt = -(h''/h')d\sigma''(t)/dt$, а из условия (1.2) совместности деформаций стенок с учетом релаксации – равенство

$$\frac{d\varepsilon'(t)}{dt} = \frac{d\varepsilon'_c}{dt} + \frac{1}{E'(T')} \frac{d\sigma'(t)}{dt} = -\frac{d\varepsilon''(t)}{dt} = -\frac{1}{E''(T'')} \frac{d\sigma''(t)}{dt}$$

Это равенство с учетом соотношений (2.2) и (2.3) приводит к системе двух дифференциальных уравнений

$$(1/E'(T') + (h'/h'')/E''(T''))d\sigma'(t)/dt = A(T')\text{sh}(B(\sigma'(t) - \sigma'_m(t)/\sigma'_0(T')))$$

$$d\sigma'_m(t)/dt = E'_h(T', \varepsilon'(t))A(T')(\text{sh}(B(\sigma'(t) - \sigma'_m(t)/\sigma'_0(T'))) - A(T')\text{sh}(B\sigma'_m(t)/\sigma'_0(T')))$$

где

$$E'_h(T', \varepsilon'(t)) = \sigma'_0(T')m'(T')(|\varepsilon'|/\varepsilon'_0(T''))^{m'(T')-1}/\varepsilon'_0(T')$$

$$\varepsilon'(t) = (p_g R' + p_f \delta - \sigma'(t)h') / (E''(T'')h'') + \varepsilon''_T - \varepsilon'_T$$

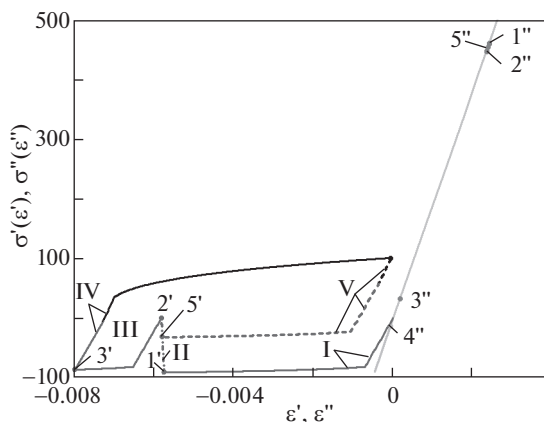


Рис. 4. Траектории рабочих точек стенок оболочки.

Интегрирование этих уравнений при начальных условиях $\sigma'(0) = \sigma'_1$, $\sigma'_m(0) = 0$, определяемых в конце этапа пуска двигателя, позволяет рассчитать процесс ползучести материала внутренней стенки в период установившегося режима работы двигателя.

На рис. 4 в координатах деформация—напряжение приведены рассчитанные траектории рабочих точек внутренней и наружной стенок оболочки на этапах первого цикла нагружения оболочки и пуска двигателя при втором цикле. Римские цифры указывают этапы нагружения внутренней стенки: I — первый пуск двигателя; II — ползучесть материала в период работы двигателя; III — сброс давления в камере сгорания при останове двигателя; IV — охлаждение оболочки до начальной температуры T_0 ; V — второй пуск двигателя. Характерные точки траекторий отмечены арабскими цифрами с одним или двумя штрихами соответственно для внутренней и наружной стенки: 1 — завершение первого пуска двигателя; 2 — начало сброса давления p_g ; 3 — начало охлаждения оболочки; 4 — завершение этапа охлаждения оболочки; 5 — завершение второго пуска двигателя. Значения температуры, напряжения и деформации в характерных точках траекторий представлены в табл. 2.

При выбранных исходных данных материал наружной стенки сохраняет свойство линейной упругости на всех этапах нагружения. За период в 200 с работы двигателя в силу ползучести материала внутренней стенки происходит практически полная релаксация напряжения σ' . Упругое деформирование материала внутренней стенки на этапе IV представлено двумя звеньями ломаной, соответствующими значениям модуля упругости E' при температурах T' и T_0 (в действительности при непрерывном изменении температуры между значениями T' и T_0 траектория рабочей точки будет криволинейной, но близкой к ломаной и имеющей с ней общие конечные точки. Аналогично представлено двумя звеньями штриховой ломаной линии начало этапа V при втором пуске.

В силу почти полной релаксации напряжения во внутренней стенке и при втором пуске двигателя траектория ее рабочей точки на этапах III и IV будет мало отличаться от траектории при первом пуске. Это означает, что при неизменном режиме работы двигателя все последующие циклы деформирования внутренней стенки можно принять совпадающими с циклом второго пуска. Таким образом, начиная со второго цикла, накопление за каждый из последующих циклов абсолютного значения неупругой деформации внутренней стенки, влияющей на повреждаемость ее материала [4], будет примерно одинаковым и близким к первому циклу. На этапе I этого цикла абсолют-

ное значение пластической деформации равно 0.005032, а на этапе II абсолютное значение деформации ползучести не превысило 0.000068. Пластическая деформация при сбросе давления в камере сгорания (этап III) по абсолютному значению равна 0.001457, а при охлаждении оболочки (этап IV) она положительна и имеет значение 0.006825. Таким образом, абсолютное значение накопленной за цикл неупругой деформации составило 0.0013382.

Существуют различные подходы к оценке работоспособности материала конструкции при циклическом неизотермическом нагружении [4, 12, 13]. Одна из наиболее простых оценок, пригодная в случае набора циклов с различающимися параметрами, состоит в сравнении суммарного абсолютного значения накопленной за все циклы неупругой деформации с относительным удлинением до разрыва образца материала при растяжении. Для хромистой бронзы БрХ08 эта величина в рассматриваемом интервале температур находится в промежутке 0.288 ... 1.204 [4]. Следует учитывать, что поврежденность материала в виде образования микротрещин возникает, в основном, при растягивающих напряжениях, а при сжатии может происходить так называемое заживление повреждений. Поэтому представленные выше суммарное абсолютное значение накопленной за цикл неупругой деформации и его составляющие на отдельных этапах нагружения оболочки следует рассматривать как исходную информацию для оценки работоспособности внутренней стенки в рамках различных подходов и методик.

Заключение. Представленный приближенный анализ нагружения оболочки камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя многократного действия позволил оценить абсолютное значение неупругой деформации, накопленной за один цикл работы такого двигателя при наличии ползучести материала этой стенки. Это значение может быть использовано для прогноза количества циклов, в течение которых материал внутренней стенки сохраняет свою работоспособность.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования России (проект 0705-2020-0047).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Феодосьев В.И.* Основы техники ракетного полета. Изд. 2-е. М.: Наука, 1981. 496 с.
2. *Моисеев В.А., Тарасов В.А., Колмыков В.А., Филимонов А.С.* Технология производства жидкостных ракетных двигателей. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 381 с.
3. *Балабух Л.И., Колесников К.С., Зарубин В.С., Алфутов Н.А., Усюкин В.И., Чижов В.Ф.* Основы строительной механики ракет. М.: Высшая школа, 1969. 496 с.
4. Прочность и ресурс ЖРД / Под ред. *Н.А. Махутова, В.С. Рачука.* М.: Наука, 2011. 525 с.
5. *Зарубин В.С., Зимин В.Н., Кувыркин Г.Н.* Оценка работоспособности оболочки камеры сгорания многократного жидкостного ракетного двигателя // Изв. вузов. Авиационная техника. 2018. № 3. С. 100–107.
6. *Феодосьев В.И.* Прочность теплонапряженных узлов жидкостных ракетных двигателей. М.: Оборонгиз, 1963. 210 с.
7. *Работнов Ю.Н., Милейко С.Т.* Кратковременная ползучесть. М.: Наука, 1970. 224 с.
8. *Зарубин В.С.* Прикладные задачи термпрочности элементов конструкций. М.: Машиностроение, 1985. 296 с.
9. *Работнов Ю.Н.* Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1988. 712 с.
10. *Ишлинский А.Ю., Ивлев Д.Д.* Математическая теория пластичности. М.: Физматлит, 2003. 704 с.
11. *Новиков И.И.* Дефекты кристаллического строения металлов. М.: Изд-во "Металлургия", 1975. 208 с.
12. *Гусенков А.П., Котов П.И.* Малоцикловая усталость при неизотермическом нагружении. М.: Машиностроение, 1983. 240 с.
13. *Александров Д.А., Зарубин В.С.* О критериях разрушения материала теплонапряженных конструкций // Машиностроение. Энциклопедия. Т. 1–3. Кн. 1. Динамика и прочность машин. Теория механизмов и машин. М.: Машиностроение, 1994. С. 176–180.