

мент сил трения, что обеспечивает безопасную работу установки в заданный период испытаний.

Разработанная установка позволяет проводить комплексное исследование материалов в химически активных средах, в том числе испытания по выбору материалов на малых образцах и испытания на натуральных образцах. Установка проста в изготовлении и эксплуатации и позволяет получать стабильные результаты.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г а н з С.Н., П а р х о м е н к о В.Д. Установка для исследования антифрикционных свойств материалов в агрессивных средах. — Заводская лаборатория, 1963, т. XXIX, № 6. 2. Г о л у б е в А.И. Уплотнения вращающихся валов. — М., 1963.

УДК 621.762

Ю.А. ВОЛКОВ, А.В. НАГОРСКИЙ,  
А.Е. ЖУТОВА, Н.И. БЕЛАЯ

### АНАЛИЗ ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Среди видов эксплуатационных нагрузок деталей машин термоциклические воздействия занимают особое место. Это обусловлено сложностью механизмов разупрочнения, происходящих в термонагружаемых деталях, а также наличием ряда факторов, противоречиво влияющих на сопротивление термической усталости материалов деталей. Класс деталей, испытывающих в процессе эксплуатации воздействие периодических теплосмен, в современном машиностроении довольно широк. Поэтому понятен интерес исследователей к мерам по борьбе с термической усталостью.

При термических нагружениях деталь испытывает неоднородные температурные деформации, обусловленные наличием температурного градиента по нормали к ее поверхности и являющиеся причиной возникновения температурных напряжений. В наиболее неблагоприятных (жестких) условиях работы находится поверхностный слой детали, температурный градиент и температурный уровень которого при тепловом нагружении обуславливают возникновение термических напряжений, выходящих за пределы упругости материала. Пластически деформированный в фазе нагрева поверхностный слой при последующем охлаждении подвергается упруго-пластической деформации растяжения, действие которой усугубляется снижением пластичности материала с понижением температуры. Многократное упруго-пластическое деформирование поверхностного слоя приводит к его термоусталостному разрушению, наблюдаемому в виде сетки разгарных трещин. Ана-

лиз явления термической усталости позволяет выделить следующие принципиальные положения: а) причиной термических напряжений в детали является температурный перепад по ее толщине; б) сопротивление материала термической усталости определяется режимом теплового нагружения и величиной предела упругости  $\sigma_T$  при температурах нагружения, который имеет тенденцию к понижению с ростом температуры; в) непосредственной причиной появления трещин термической усталости являются растягивающие напряжения, возникающие при охлаждении поверхности детали; г) работоспособность материала при прочих равных условиях определяется его работой разрушения.

Принимая во внимание основные закономерности термической усталости, можно дать понятие идеально термостойкого материала. Такой материал должен обладать высокой теплопроводностью и пределом упругости при рабочих температурах, близким к нулю коэффициентом термического расширения, большой работой разрушения, стойкостью к высокотемпературной коррозии и большим термическим сопротивлением на рабочей поверхности. Такое сочетание свойств материала позволит убрать температурный перепад по толщине детали и снизить термические напряжения до величины, не превышающей предел упругости. К сожалению, такой материал не существует, поэтому практика борьбы с термической усталостью выработала ряд приемов, позволяющих частично реализовать свойства идеально термостойкого материала.

Анализ способов повышения термической стойкости показывает необходимость дальнейшего развития мер борьбы с разгаром. Преимущество могут получить те методы, которые сочетаются с уже известными. В этой связи представляет интерес создание материалов с повышенными теплоаккумулирующими свойствами, что при прочих равных условиях должно снизить температурный перепад по толщине детали. Установлено, что теплоаккумулирующая способность металлов, обусловленная их объемной теплоемкостью, на два порядка меньше их "скрытой" теплоты фазового перехода первого рода. Это дает основание сделать попытку использовать "скрытую" теплоту для повышения теплоаккумулирующих свойств материалов в целом.

Для экспериментов могут использоваться материалы, представляющие собой двойные металлические системы типа псевдосплавов, компоненты которых имеют значительную разницу температур плавления. Основу материала составляет пористый каркас из более тугоплавкого компонента, определяющий конструкционную прочность материала при рабочих температурах. Легкоплавкий компонент (температура плавления его соизмерима с температурным уровнем разогрева материала) равномерно распределен в порах основы. При поверхностном нагреве и охлаждении фронт фазового перехода продвигается вглубь материала и в обоих случаях "скрытая" теплота во фронте фазового перехода противодействует внешнему тепловому

воздействию. Особенность существования таких материалов позволяет отнести их к классу гетерофазных (в рабочем цикле фазы находятся в различных агрегатных состояниях).

Гетерофазные материалы (ГФМ) могут быть получены методами порошковой металлургии, которые реализуют ряд внутренних конструкций материала, противостоящих механизмам термической усталости. Кроме того, они позволяют в значительной мере регулировать теплофизические характеристики материала, что, несомненно, имеет значение для повышения термической стойкости деталей.

Нами проведено исследование влияния "скрытой" теплоты фазового перехода легкоплавкого компонента ГФМ на температурное поле при режимах теплового нагружения, близких к реальным. Задача определения температурных полей в ГФМ аналогична задаче определения глубин промерзания грунта и сводится к решению нелинейного уравнения нестационарной теплопроводности с переменными источниками тепла при заданных граничных и начальных условиях [1].

Анализ методов решения задач подобного типа [2] показал, что они могут быть решены приближенно методом математического моделирования на аналоговых моделях. Нами была выбрана гидравлическая модель [3], которая позволяет учесть все особенности ГФМ.

При постановке задачи было принято допущение, что исследуемое тело (бесконечная пластина толщиной 0,03 м) образовано из изотропного ГФМ, имеющего постоянные теплофизические характеристики в рассматриваемых интервалах температур. Основные параметры моделируемых материалов представлены в таблице. Коэффициент теплоемкости и плотность для рассмотренных соотношений гетерофазных систем определены расче-

Т а б л и ц а

Характеристики моделируемых материалов

Материал	Содержание легкоплавкой фазы, % объемн.	Температура плавления легкоплавкой фазы, К	Количество "скрытой" теплоты фазового перехода, кДж/кг	Теплофизические характеристики	
				коэффициент теплопроводности, Вт/(м·град)	коэффициент температуропроводности $a \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с
Чугун СЧ21-40	—	—	—	42,0	11,1
Fe — Cd № 1	35	594	23,45	54,3	19,6
Fe — Cd № 2	28	594	18,38	51,3	17,0
Fe — Pb	28	601	10,36	35,0	12,4

том по правилу аддитивности. Эффективная теплопроводность ГФМ вычислялась по методике, предложенной в работе [4]. Рассмотрим один из экстремальных случаев термического нагружения тела, состоящего из ГФМ системы (Fe — Cd №1).

Режим теплового нагружения в виде граничного условия второго рода получен в результате решения обратной тепловой задачи для чугунной стенки. Решение состоит в том, что полученные экспериментально температурные поля [5] для чугунной стенки были воспроизведены на соответствующей гидравлической модели путем подбора граничного условия при тех же начальных условиях.

На рис. 1, а показано граничное условие, соответствующее реальному режиму теплообмена на границе алюминиевая отливка — чугунная стенка. На рис. 1, б приведены температурные кривые для рабочей и наружной поверхностей чугунной стенки, полученные экспериментально (показаны сплошными линиями), и температурные кривые (показаны штриховыми линиями) при задании граничного условия.

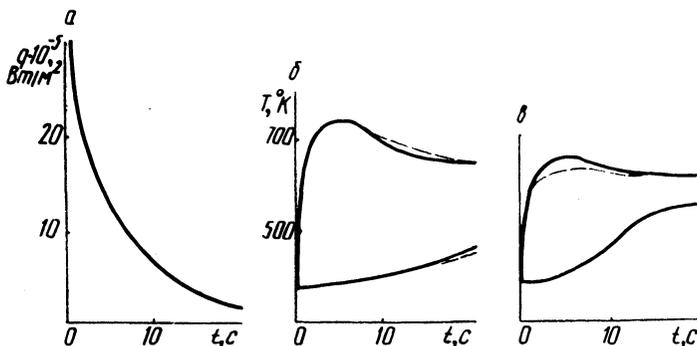


Рис. 1. Режим теплового нагружения и соответствующие ему температурные поля:

а — закон теплообмена на границе алюминиевая отливка — чугунная стенка; б — температурные кривые для поверхностей стенки из чугуна СЧ 21-40; в — то же для стенки из материала Fe — Cd №1

На рис. 1, в показаны температурные кривые тех же поверхностей ГФМ состава Fe — Cd №1, полученные при моделировании процесса теплопроводности с начальными и граничными условиями предыдущей задачи. Значительное снижение температурного перепада по сравнению с чугунной стенкой объясняется более высоким эффективным коэффициентом теплопроводности материала. Для оценки влияния теплоты фазового перехода на снижение температурного перепада эта задача решалась повторно, при этом в модели ГФМ были отключены элементы, воспроизводящие поглощение "скрытой" теплоты плавления. Полученная кривая температуры рабочей поверхности изображена на рис. 1, в штриховой линии. Снижение температурного перепада в стенке за счет поглощения "скрытой" теплоты во

фронте плавления Cd в рассмотренной задаче составило 20 К (10% от максимального перепада). Положительное влияние эффекта снижения температурного перепада в поверхностном слое материала имеет большое значение для увеличения термической стойкости, поскольку приходится на интервал температур вблизи областей потери упругих свойств каркаса ГФМ.

Как отмечалось, приведенный режим термического нагружения относится к экстремальному и характерен для таких высокоинтенсивных процессов, как литье под давлением стали в кокиль, на внутренней поверхности которого отсутствует дополнительное термическое сопротивление. По данным [6], тепловой удар, испытываемый чугунной изложницей при литье стали, составляет в начальный момент  $(11 \div 17) \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>, т.е. примерно в два раза меньше чем в рассмотренном случае.

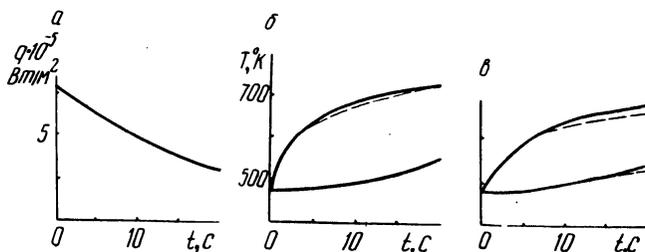


Рис. 2. Режим теплового нагружения и соответствующие ему температурные поля:

а — закон теплообмена на границе алюминиевая отливка — окрашенная чугунная стенка; б — температурные кривые для поверхностей стенки из материала Fe — Pb; в — то же для стенки из материала Fe — Cd № 2.

На практике в большинстве случаев прибегают к созданию на рабочей поверхности формы дополнительного термического сопротивления в виде оксидных пленок или теплоизоляционного слоя краски, значительно снижающих интенсивность теплообмена между отливкой и формой. Поэтому эффект снижения температурного перепада по сечению таких форм более значителен. Иллюстрацией этому могут служить температурные кривые, приведенные на рис. 2. На рис. 2, а показана закономерность теплообмена на границе алюминиевая отливка — окрашенная чугунная стенка с толщиной краски  $X_{кр} = 0,1$  мм. Граничное условие теплообмена получено путем решения обратной задачи теплопроводности, как и в предыдущем случае. На рис. 2, б сплошными линиями изображены температурные кривые для материалов соответственно Fe — Pb и Fe — Cd № 2, штриховыми — температурные кривые, полученные с учетом поглощения "скрытой" теплоты плавления свинца и кадмия. Снижение перепада за счет поглощения теплоты по толщине стенки составляет для материала Fe — Pb 12%, для материала Fe — Cd — 15% от максимального перепада.

Анализ ряда задач позволил установить, что эффект снижения температурного перепада зависит от относительного содержания в ГФМ легкоплавкой фазы, ее теплоты фазового перехода, режима термического нагружения, а также от величины эффективных теплофизических характеристик ГФМ в целом. Относительная жесткость выбранных режимов нагружения позволяет предположить, что при работе изделий в менее тяжелых условиях эффект снижения температурного перепада будет более значительным.

Исследование показало перспективность применения ГФМ для инструмента и деталей, подвергающихся по условиям работы циклическим нагревам и охлаждениям. Использование ГФМ можно сочетать с такими известными способами, как повышение теплопроводности и механических характеристик материала, членение рабочей поверхности, ее термическая изоляция. Разработанный метод исследования режимов термического нагружения позволяет выбрать оптимальный состав ГФМ для конкретных условий эксплуатации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лыков А.В. Теория теплопроводности. — М., 1967.
2. Коздоба Л.А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности. — М., 1975.
3. Лукьянов В.С. Гидравлические приборы для технических расчетов. — Изв. АН СССР, отд. техн. наук, 1939, № 2, 58.
4. Дольнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. — Л., 1974.
5. Вейник А.И. Тепловые основы теории литья. — М., 1953.
6. Иванцов Г.П., Афанасьев К.И., Селькин Г.С. Исследование теплообмена слитка и изложницы. — Теплотехника слитка и печей, 1953, вып. 2.

УДК 621.7

В.С. ИВАШКО, Н.В. СПИРИДОНОВ,  
А.А. КОРОЛЬКО, А.С. НИКИТИНА

#### К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОКРЫТИЙ ИЗ САМОФЛЮСЮЮЩИХСЯ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ, НАНЕСЕННЫХ МЕТОДОМ НАПЫЛЕНИЯ

Покрытия из износостойкого сплава ПГ-Ср4 (ГОСТ 21448-75), нанесенные методом плазменного напыления на рабочие поверхности деталей машин, находят широкое применение в различных областях техники.

Расчет годовой экономической эффективности от применения упрочняющей технологии для деталей, работающих менее одного года, на одну машину можно произвести по формуле [1].