

УДК 536.12:621.891

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ РЕМОНТНЫХ ПОКРЫТИЙ  
ВАЛОВ ПОД ПОСАДКУ ПОДШИПНИКОВ**

*канд. техн. наук, доц. С.В. ПИЛИПЕНКО,  
канд. техн. наук, доц. В.А. ФРУЦКИЙ, М.В. КОНОН  
(Полоцкий государственный университет)*

*Приведены результаты экспериментального исследования тепловых процессов в ремонтных покрытиях. Установлена и объяснена взаимосвязь между тепловыделением, температуропроводностью и структурой покрытия. Показано, что покрытия с преобладанием эвтектики имеют наименьшую температуропроводность по сравнению с доэвтектическими и заэвтектическими покрытиями и соответственно высокие значения тепловыделения. Максимальная температуропроводность характерна для покрытий с доэвтектической концентрацией бора с преобладанием в покрытии бористого феррита.*

**Ключевые слова:** боридная эвтектика, температуропроводность, тепловыделение, средняя объемная температура.

**Введение.** Серые чугуны обладают широким спектром функциональных возможностей [1]. Гетерогенизация структуры, обеспечивающая высокий комплекс эксплуатационных свойств возможна не только традиционными металлургическими приемами, но и при получении ремонтных покрытий из материалов, отходов производства [2; 3].

Известно, что эвтектические структуры в системе Fe-C-X, обладая максимальной гетерогенностью, являются наиболее температуропроводными [4]. Очевидна необходимость учета теплофизических свойств эвтектических сплавов, предназначенных для работы в качестве теплопроводящих покрытий. Широкие возможности управления структурой покрытий из порошков, позволяют изучить влияние различных легирующих элементов на теплофизические свойства покрытий и «сконструировать» покрытие, обладающее высоким комплексом эксплуатационных свойств.

**Цель работы** – изучение взаимосвязи между структурой и температуропроводностью гетерогенных эвтектических покрытий из стружечного материала, дополнительно легированного материалами, необходимыми для данных условий эксплуатации.

**Материалы и методики исследования.** Сырьем для получения диффузионно легированных (ДЛ) порошков служила измельченная стружка серого чугуна. В качестве легирующих элементов были выбраны бор и медь, создающие структуры Шарпи, максимально отвечающие эксплуатационным требованиям [5].

Газотермические покрытия из ДЛ-порошков получали плазменным напылением на стальную подложку на установке УПУ-3Д в струе азотной плазмы [6]. Покрытия изучали традиционными методами: металлографическим (ГОСТ 9.302), дюротрическим (ГОСТ 200017, ГОСТ 299999), микродюротрическим (ГОСТ 9450), фазовым рентгеноструктурным полуколичественным анализом.

Измеряли также объемную температуру в зоне нагрева контактным методом [5]. Тепловые процессы, как известно, отличаются высокой степенью неравновесности. Поэтому для анализа теплового процесса целесообразно знать температуропроводность покрытия. Для этого был разработан метод определения коэффициента температуропроводности, относящийся к классу инверсных задач [7].

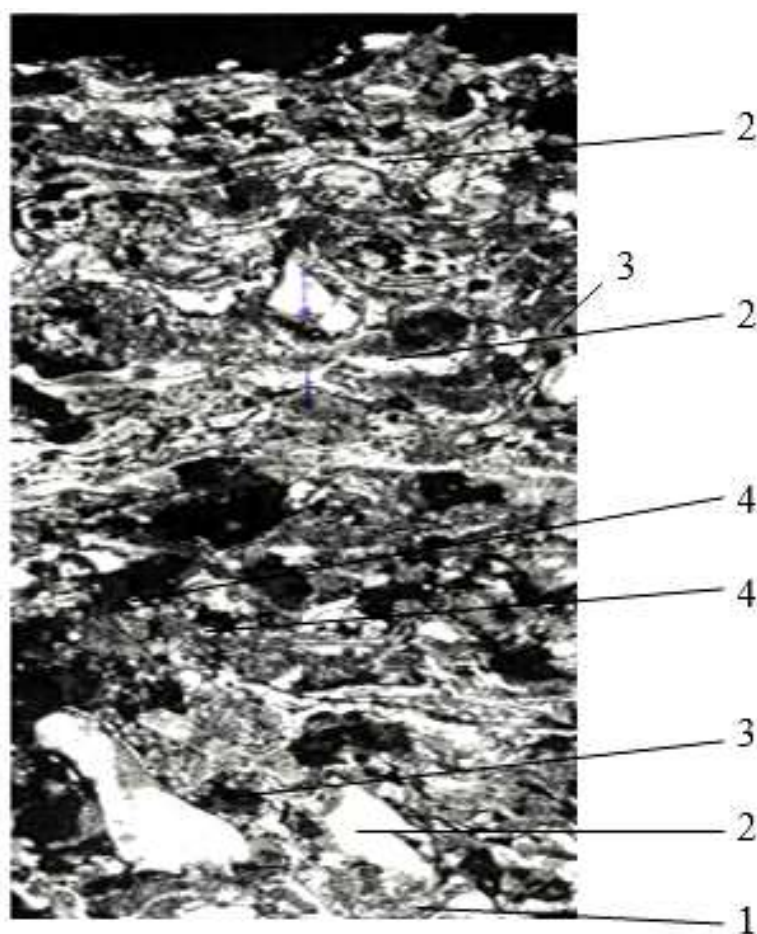
**Результаты исследования и их обсуждение.** Анализируемые газотермические покрытия имеют характерное гетерогенное строение (рисунок 1).

Структура и свойства исходного материала приводилась в работе [8]. Анализ многообразия полученных покрытий позволил сформулировать закономерности структурообразования материалов [9]. Доказано, что материал, полученный в результате проведенных технологических операций, имеет повышенные физико-механические свойства, по сравнению с известными материалами [10; 11].

Комплекс выполненных исследований позволяет сформулировать некоторые закономерности структурообразования плазменных покрытий из легированной бором и медью чугунной стружки. ДЛ-порошок из чугунной стружки представляет собой частицы, имеющие боридную и бороцементитную оболочку с локальными медными фрагментами на поверхности. В результате плазменного напыления происходят определенные изменения в фазовом составе, приводящие к некоторому повышению физико-химической равновесности материала (таблица 1).

Таблица 1. – Фазовый состав боромеденной чугушной стружки и плазменного покрытия из нее (полуколичественный фазовый рентгеноструктурный анализ)

Фаза	ДЛ-порошок	Плазменное покрытие
	Содержание фазы % объемн.	Содержание фазы, % объемн.
$Fe_{\alpha}(C)$	16	8
Cu	21	18
Графит	2,5	–
$Fe_2B$	9	13
FeB	16	15
CuO	10	–
$Fe_2O_3$	12	–
$Fe_3C, Fe_3(BC)$	2,5	23



1 – участки мелкодисперсной бористой эвтектики; 2 – ламели  $\alpha$  - фазы с фрагментами перлита; 3 – медистые включения; 4 – боридные, бороцементитные включения

Рисунок 1. – Микроструктура плазменного покрытия из диффузионно-легированной бором и медью стружки серого чугуна ( $\times 300$ )

Анализ микроструктуры свидетельствует о наличии перлитной матрицы, медной фазы и боридов железа. В покрытии не обнаружено графитных включений. Это, скорее всего, связано, во-первых, с механическим способом приготовления шлифа, при котором возможно механическое выкрашивание мягких составляющих, и во-вторых – с растворением графита расплавленными частицами и возможным его выгоранием.

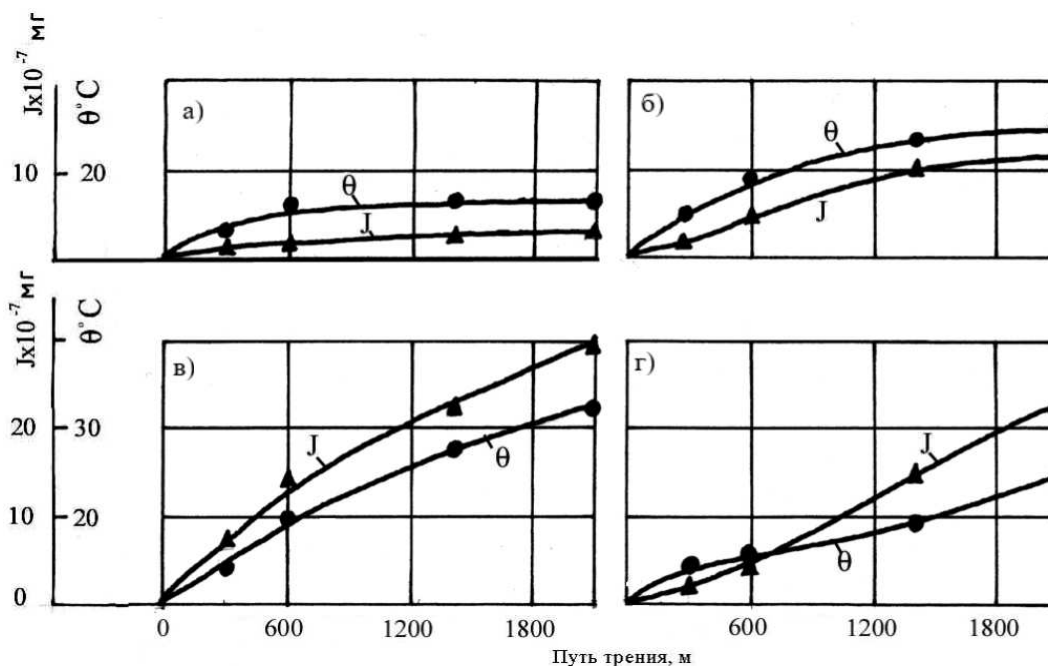
В структуре материала заметно увеличивается процентное содержание легкоплавких эвтектик: с 15 – 18% в исходном составе до 26 – 32% в составах с содержанием бора. Средняя разность между микротвердостями структурных составляющих материала составляет  $\Delta H_{\mu} = 500$  ( $H_{\mu} = 1300\text{--}1800$ ). На периферии присутствуют мелкодисперсные локальные частицы меди, переходящие к центру в средние и крупные локальные группировки. Количественный процент эвтектик остался без изменения. Средняя разность между микротвердостями структурных составляющих материала составляет  $\Delta H_{\mu} = 300$  ( $H_{\mu} = 1500\text{--}1800$ ).

В результате исследований выявлено увеличение легированности твердого раствора углеродом, бором и медью, уменьшение количества высокобористых фаз, образование локальных участков эвтектики  $Fe_3(BC)$ ,  $Fe_2B + Fe_{\alpha}(C, B)$ . Следует отметить изолированное расположение медных фрагментов между ламелями покрытия, что играет важную роль в теплофизических свойствах покрытий.

Определяющим фактором структурообразования покрытия наряду с режимами напыления, является химический состав ДЛ-порошка. Пропорционально увеличению содержания меди в ДЛ-порошке происходит увеличение количества «медных» участков в покрытии. Для содержания меди менее 15% масс. характерно наличие мелкодисперсных включений по всему объему покрытия. При большем содержании меди происходит дифференциация медистой фазы по объему покрытия и формирование отдельных крупных включений (80...120 мкм). Бор, являясь химически активным элементом, оказывает более существенное влияние на структурообразование покрытий. Значительную часть объема покрытия занимает мелкодисперсная боридная эвтектика. Следует отметить, что эвтектическая концентрация смещена в сторону меньших содержаний бора, что обусловлено повышенной скоростью охлаждения расплава, неравновесной кристаллизацией и получением квазиэвтектики. Поэтому первичные высокотвердые боридные и бороцементитные фазы в покрытии присутствуют уже при доэвтектической концентрации бора в покрытии.

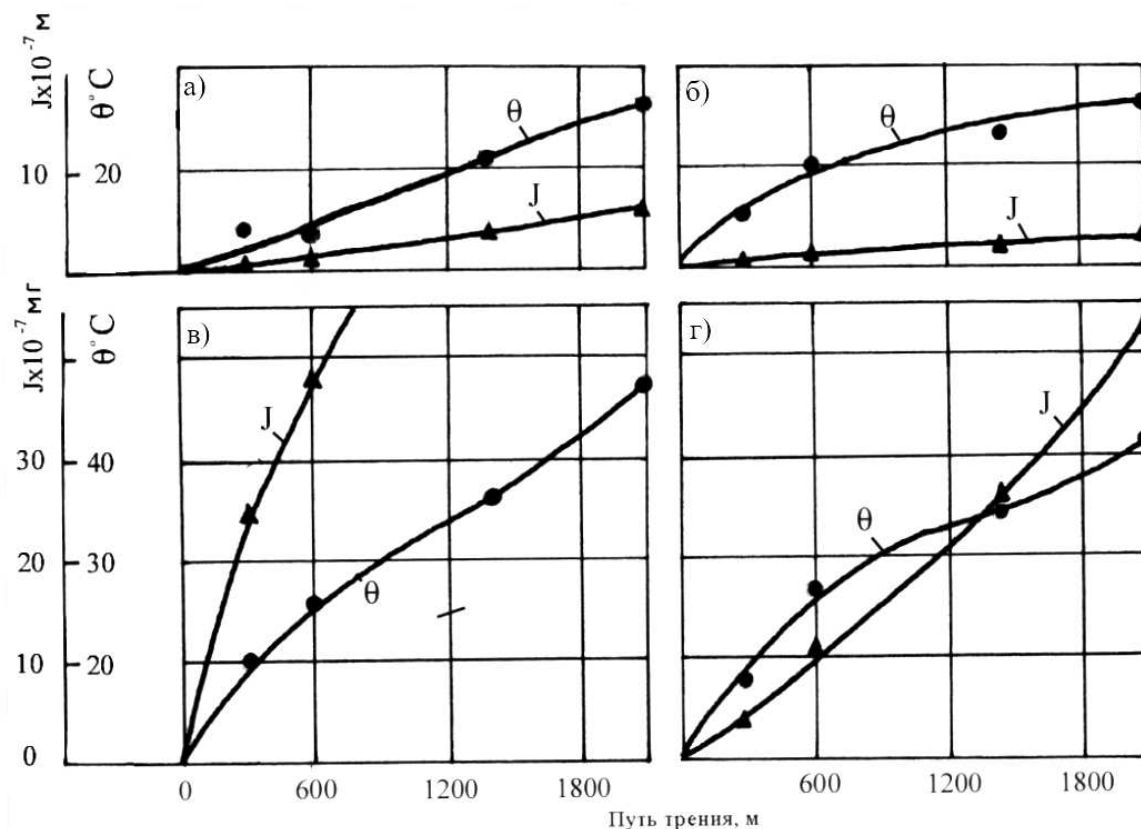
Следующим этапом исследований стало изучение теплового режима работы разработанных покрытий. Установлено влияние структуры материала на установление теплового режима (рисунки 2, 3). При малых, доэвтектических концентрациях бора, нагрев материала невелик. Важна также тенденция к стабилизации этих параметров.

Неожиданные результаты получены при анализе эвтектических покрытий, традиционно считающихся наиболее температуропроводными. Прогрессирующий характер повышения температуры свидетельствуют о крайне нестабильных условиях теплопередачи. Наиболее ярко обнаруженные закономерности проявляются в условиях переменного нагрева, что подтверждает важность анализа теплового режима трения (рис. 3).



Содержание бора, % по массе: а) 0,5–1,5; б) 1,5–2,0; в) 2,0–4,0; г) 4,0–6,0.

Рисунок 2. – Изменение температуры и износа вкладыша с газотермическим покрытием из боромеденной чугунной стружки в процессе испытаний при постоянной нагрузке



Содержание бора, % по массе: а) 0,5–1,5; б) 1,5–2,0; в) 2,0–4,0; г) 4,0–6,0.

**Рисунок 3. – Изменение температуры и износа вкладыша с газотермическим покрытием из боромеденной чугунной стружки в процессе испытаний при переменной нагрузке**

Объяснение полученных результатов потребовало изучения теплопроводности покрытий. Как известно, в общем случае, перенос тепла в многофазном, пористом дисперсном твердом теле, каким является анализируемое покрытие, осуществляется посредством: теплопроводности самих частиц материала, теплопроводности оксидных пленок, молекулярной теплопроводности газа, заполняющего поры, контактной теплопроводности межчастичных контактов, а также конвекцией газа в порах и излучением от частицы к частице [12]. Позднее было установлено, что преобладающая часть тепла в газотермическом слоистом покрытии передается в местах контакта между ламелями [13; 14].

В анализируемом покрытии контактные области между ламелями являются преимущественно бористым сплавом различной степени эвтектичности (см. Рисунок 1). Эвтектика мелкодисперсная, в ряде случаев зернистая. Именно через эти области проходит основной поток тепла. Полученные результаты определения коэффициента теплопроводности боросодержащих сплавов свидетельствуют об определяющем влиянии бора (таблица 2). Резкое снижение теплопроводности сплава при легировании бором обусловлено гетерогенизацией последнего и является известным фактом [14]. А вот обнаруженная экстремальность влияния бора на теплопроводность сплава требует объяснения. Установлено, что минимальной теплопроводностью обладают сплавы эвтектической концентрации, для которых характерна наибольшая степень гетерогенности вследствие преобладания мелкодисперсной механической смеси бористого феррита и бороцементита. Дальнейшее увеличение содержания бора формирует заэвтектическую структуру с преобладанием относительно крупных первичных боридов. Бориды железа  $Fe_2B$  обладают низкой теплопроводностью ( $\lambda^{20\text{ }^\circ\text{C}} = 0,3 \text{ Вт/см}\cdot\text{К}$ ), однако количество мелкодисперсной эвтектики и, следовательно, степень гетерогенности покрытия в этом случае снижается, поэтому происходит некоторое повышение теплопроводности. Наибольшая теплопроводности в анализируемой системе характерна для доэвтектических концентраций бора. Избыточной фазой в этом случае является бористый феррит, обладающий существенно большей теплопроводностью, а содержание эвтектики в покрытии невелико.

Таблица 2. – Влияние содержания бора на температуропроводность покрытий системы Fe – С – В

Содержание бора, % по массе	Коэффициент температуропроводности $\alpha \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ для интервала температур $^{\circ}\text{C}$					
	50–100	100–150	150–200	200–250	250–300	300–350
0	22,900	22,317	21,928	21,442	19,734	18,552
2,5–3,1	8,570	8,563	8,210	7,725	7,403	6,832
3,2–4,1	3,450	3,256	3,181	3,189	3,145	2,966
4,8–5,2	7,322	6,936	6,552	6,101	5,793	5,583

Установленные факторы влияния бора на температуропроводность покрытий позволяют предложить характер взаимосвязи теплофизических свойств газотермических бористых покрытий и его структуры. Тепловой режим покрытия, как известно, обусловлен протеканием конкурирующих процессов тепловыделения и теплопередачи. При относительно постоянных показателях тепловыделения решающее значение будет иметь теплопередача.

Покрытия, имеющие заэвтектическую концентрацию бора, обладают минимальным тепловыделением вследствие наличия в их структуре первичных боридных и бороцементитных фаз. Для этих покрытий характерна линейная зависимость роста температуры [15]. Покрытия с эвтектической концентрацией бора, как было показано выше, обладают наименьшей температуропроводностью, чем обусловлен параболический рост температуры покрытия. Покрытие с доэвтектической концентрацией бора обладает максимальной температуропроводностью в анализируемой системе [16].

**Заключение.** На температуропроводность газотермических покрытий из боромеденной стружки серого чугуна оказывает существенное влияние их структура. Наименьшая температуропроводность и, соответственно, неудовлетворительные эксплуатационные свойства характерны для покрытий с эвтектической концентрацией бора. Это обусловлено крайне низкой температуропроводностью дисперсной эвтектической механической смеси бористого феррита и бороцементита. Поэтому количество боридной эвтектики в указанных покрытиях следует ограничивать. Увеличение температуропроводности покрытий с доэвтектической концентрацией бора, обусловленное уменьшением доли эвтектики за счет увеличения количества бористого феррита, обеспечивает повышение эксплуатационных свойств.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Камынин, В.В. Разработка и использование антифрикционных чугунов для тяжело нагруженных узлов трения : автореф. дисс. ... канд. техн. наук : 05.16.01 / В.В. Камынин. – Курск, 2000. – 18 с.
2. Восстановление деталей машин : справ. / Ф.И. Пантелеенко [и др.] ; под ред. В.П. Иванова. – М. : Машиностроение, 2003 – 672 с.
3. Ragutkin, A.V. Some aspects of antifriction coatings application efficiency by means of finishing nonabrasive antifriction treatment / A.V. Ragutkin, M.I. Sidorov, M.E. Stavrovskij // Journal of Mining Institute. – 2019. – Vol. 236. – P. 239–244.
4. Исследование графитных включений в микроструктурах чугуна тормозных локомотивных колодок / А.А. Климов [и др.] // Вестник ПНИПУ. – 2017. – Т. 19(№ 3). – С. 19–32.
5. Штемпель, О.П. Интенсификация диффузионного легирования металлических порошков для защитных покрытий в подвижных порошковых смесях : автореф. дисс. ... канд. техн. наук / О.П. Штемпель ; Полоц. гос. ун-т. – Новополоцк : ПГУ, 2003. – 24 с.
6. Авсиевич, А.М. Технология формирования износостойких газотермических покрытий из диффузионно-легированных самофлюсующихся порошков на железной основе : автореф. дисс. ... канд. техн. наук / А.М. Авсиевич ; Белор. нац. техн. ун-т. – Минск, 2003. – 24 с.
7. Лысенко, Ю.В. Экспериментальные исследования температуры в теплонагруженных узлах трения / Ю.В. Лысенко, В.А. Балакин // Трение и износ. – 2003. – Т. 24(№ 2). – С. 179–185.
8. Сороговец, В.И. Получение износостойких покрытий плазменной наплавкой диффузионно-легированных самофлюсующихся порошков : автореф. дисс. ... канд. техн. наук : 05.02.01 / В.И. Сороговец. – Новополоцк, 2001. – 24 с.
9. Константинов, В.М. Газотермические покрытия из диффузионно-легированной стружки как альтернатива антифрикционным бронзам / В.М. Константинов, В.А. Фруцкий // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2002. – № 6. – С. 36–39.
10. Константинов, В.М. Взаимосвязь структуры и свойств антифрикционных газотермических покрытий из боромеденной чугунообразующей стружки / В.М. Константинов, В.А. Фруцкий // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2003. – № 3. – С. 7–11.

11. Пилипенко, С.В. Альтернативные материалы для ремонта роторной группы насос-моторов / С.В. Пилипенко, В.А. Фруцкий // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2019. – № 3. – С. 102–106.
12. Ярошевич, В.К. Антифрикционные покрытия из металлических порошков / В.К. Ярошевич, М.А. Белоцерковский. – Минск : Наука и техника, 1981. – 174 с.
13. Ворошнин, Л.Г. Влияние структуры защитных покрытий на их износостойкость / Л.Г. Ворошнин, Ф.И. Пантелеенко, С.Н. Любецкий // Трение и износ. – 1991. – Т. 12(№ 2). – С. 310–314.
14. Смирнов, Е.В. Виды переноса тепловой энергии в металлически плазменно-напыленных покрытиях и некоторая качественная оценка их теплопроводности / Е.В. Смирнов, В.Е. Ионин // Инженерно-физический журн. – 1970. – Т. 18(№ 4). – С. 17–20.
15. Кудинов, В.В. Нанесение покрытий напылением: Теория, технология и оборудование / В.В. Кудинов, Г.В. Бобров. – М. : Металлургия, 1992. – 432 с.
16. Туник, А.Ю. Структурные особенности антифрикционных покрытий с добавками твердых смазок, полученных различными методами напыления / А.Ю. Туник // Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. – 2012. – № 25. – С. 163–170.

Поступила 18.06.2019

## THERMAL PROPERTIES OF GAS-THERMAL REPAIR COATINGS SHAFTS TO FIT BEARINGS

*S. PILIPENKO, V. FRUCCI, M. KONON*

*The results of an experimental study of thermal processes in repair coatings are presented. The relationship between heat release, thermal diffusivity and coating structure has been established and explained. It was shown that coatings with a predominance of eutectic have the lowest thermal diffusivity compared to pre-eutectic and hypereutectic coatings and, accordingly, high heat release values. Maximum thermal diffusivity is characteristic for coatings with a hypereutectic concentration of boron with a predominance of boron ferrite in the coating.*

**Keywords:** *boride eutectic, thermal conductivity, heat generation, average volume temperature.*