

Значения y'_i и d_i и D для таблицы 1

№	y'_1	d_1	y'_2	d_2	y'_3	d_3	y'_4	d_4	y'_5	d_5	Pd_i	D
1	3,00	1,00	3,00	1,00	-0,30	0,27	1,53	0,80	-0,025	0,36	0,0787	0,60
2	3,00	1,00	3,00	1,00	-0,50	0,20	1,95	0,90	-0,500	0,20	0,0360	0,52
3	3,00	1,00	3,00	1,00	-0,50	0,20	1,34	0,78	-0,225	0,30	0,0486	0,55
4	3,00	1,00	3,00	1,00	-0,48	0,21	1,95	0,90	-0,225	0,30	0,0567	0,56
5	1,18	0,73	1,61	0,82	2,48	0,97	0,13	0,38	2,40	0,96	0,2118	0,74
6	0,95	0,66	1,54	0,80	0,60	0,55	0,65	0,56	0,13	0,38	0,0618	0,57
7	0,95	0,66	1,49	0,79	1,24	0,75	0,19	0,42	0,81	0,62	0,1018	0,64
8	1,10	0,72	1,58	0,81	0,47	0,79	0,53	0,51	0,55	0,52	0,1222	0,65

дежность материала отливок. Причем $\sigma_b = 1000$ МПа, $\sigma_{0,2} = 765$ МПа и $\delta = 9,3\%$, что превышает требуемые значения этих характеристик ($\sigma_b > 900$ МПа, $\sigma_{0,2} > 550$ МПа и $\delta = 5\%$).

Таким образом, пользуясь обобщенным показателем характеристик материалов, можно более обоснованно выбирать оптимальный вариант технологического процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вознесенский В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. – М.: Статистика, 1974. – 192 с.
2. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 205 с.

УДК 620.22

К. Э. БАРАНОВСКИЙ, канд. техн. наук,
А. С. КАЛИНИЧЕНКО, д-р техн. наук,
В. Я. КЕЗИК, д-р техн. наук,
Е. А. ВОРОНИН (БНТУ)

ЛИТЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ – ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ НАПРАВЛЕНИЯ

Литые композиционные материалы принадлежат к группе материалов с нульмерными упрочняющими компонентами, имеющими три размера одного и того же порядка и равномерно распределенными в объеме матрицы. В качестве упрочняющей фазы используются гранулы или сферические частицы различной степени дисперсности. Матрица служит основой материала, связывает другие элементы, передает и распределяет нагрузку

между ними. К этой группе относятся также дисперсно-упрочненные материалы, материалы на основе керамики, содержащие короткие нитевидные кристаллы. По своему строению к ней близки и псевдосплавы, которые обычно получают методом порошковой металлургии с последующей пропиткой расплавом более легкоплавкого металла. Образуется каркасная структура, открывающая широкие возможности регулирования свойств за счет варьирования концентраций и химического состава фаз. Названные композиционные материалы по своей природе гетерогенны на макроуровне, что дает возможность получить сумму эксплуатационных свойств нового качества, которые не может иметь отдельный элемент, входящий в состав композиции. При этом материалы могут быть с заранее прогнозируемыми необходимыми свойствами. Широкое применение композиционных материалов во многом сдерживается все еще достаточно высокой ценой, обусловленной технологией их производства. С этой точки зрения несомненный интерес представляют литые композиционные материалы (ЛКМ). Для их производства используется недорогая литейная технология, что позволяет расширить номенклатуру материалов, применяемых в качестве армирующей фазы. ЛКМ по своему составу близки к материалам, получаемым методом порошковой металлургии, и псевдосплавам, но в отличие от них детали могут быть практически любой геометрии и размеров по значительно меньшей цене.

Литые композиционные материалы являются относительно новым классом композитов и характеризуются свойствами, которые превосходят обычные литейные и деформируемые сплавы [1, 2]. Литые композиционные материалы получают путем жидкофазного совмещения металлического расплава и армирующих элементов. При организации массового производства наиболее приемлем метод литья в постоянную форму (кокиль), в которой предварительно размещаются армирующие элементы (рис. 1).

С точки зрения управления процессом получения изделий с требуемыми свойствами наибольший интерес представляет изучение взаимодействия расплава с армирующими элементами. Структура литых композиционных материалов формируется в результате реализации многостадийных, последовательно и параллельно протекающих процессов, включающих физико-химическое взаимодействие при контакте твердой и жидкой фаз, кристаллизацию и затвердевание матрицы, диффузионные процессы в твердых фазах и др. Для получения ЛКМ высокого качества с надежной, заранее заданной связью структурных элементов, высокими эксплуатационными свойствами необходимо учитывать общие закономерности формирования структуры. Одним из основных условий формирования ЛКМ является смачивание армирующих элементов расплава матрицы и заполнение им пор, капилляров и других пустот. Смачивание расплавом приводит к тесному контакту фаз – необходимому условию для развития процессов физико-химического взаимодействия на границе раздела. Процесс

формирования растворно-диффузионного соединения состоит из нескольких стадий: растворение твердой фазы жидкой, взаимной диффузии атомов твердой фазы и расплава матрицы, выделение из расплава пересыщающего его компонента. Кроме взаимодействия матричного расплава с армирующими элементами на свойства ЛКМ влияют также составы расплава и армирующих элементов.

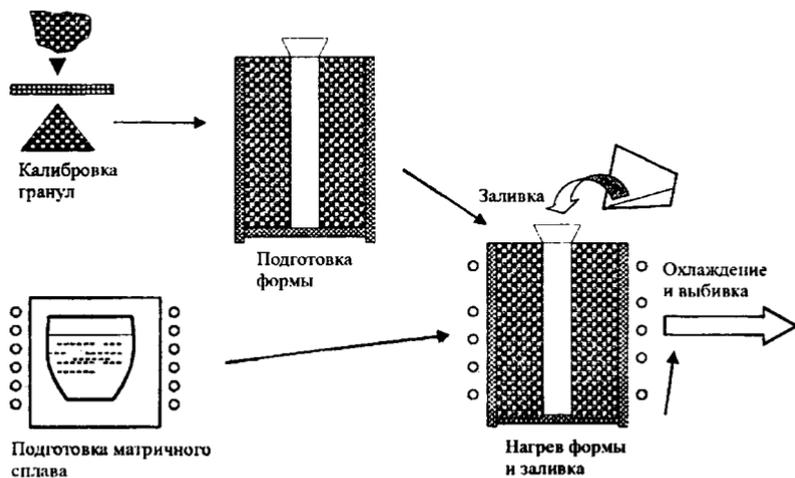


Рис. 1. Схема литья в постоянную форму (кокиль)

Литые композиционные материалы на основе железоуглеродистых гранул и бронзовой матрицы разрабатывались и применялись в качестве антифрикционных материалов для узлов трения с высокими нагрузками и скоростями без смазки [3]. Однако значительное количество узлов трения в промышленности, в частности в энергетическом оборудовании, характеризуется кроме высоких удельных нагрузок низкими скоростями движения или качающимся режимом, работой в условиях смазки. Во многих случаях узлы эксплуатируются при температуре выше 200°C . Поэтому при разработке новых видов ЛКМ для триботехнических целей эти факторы должны учитываться.

В условиях высоких нагрузок для узлов трения скольжения обязательно применение материала, имеющего механические свойства выше, чем свойства бронз (для обеспечения более высокой работоспособности). В табл. 1 приведены сравнительные характеристики ЛКМ и стандартных бронз. Как видно, использование армирующих элементов в 1,5 – 3 раза увеличивает пределы пропорциональности и текучести при сжатии по сравнению с бронзами.

Все узлы трения при высоких нагрузках и низких скоростях работают в граничном режиме смазки. Обычные консистентные смазки уменьшают

изнашивание и снижают коэффициент трения до 0,09 – 0,15, что не в полной мере отвечает условиям длительной и надежной работы узла. Как следствие, необходимо применение и создание новых смазок и материалов.

Таблица 1

Сравнительные характеристики ЛКМ и стандартных бронз

Материал	Предел пропорциональности при сжатии σ'_{py} , МПа	Предел текучести $\sigma'_{0,2}$, МПа	Предел прочности при сжатии σ'_c , МПа
Гранулы ДЧЛ диаметром 1,0 мм + БрК5,5	280	348	> 1700 (точное значение не определено из-за нехватки усилия пресса); деформация 62%
Гранулы ДЧЛ диаметром 0,5 мм и 1,0 мм + БрК5,5	266	370	816
Гранулы ДЧЛ диаметром 1,0 мм + БрК3Мц1	299	412	837
Бронза БрК5,5 литая + отжиг	185	223	659
Бронза БрК3Мц литая + отжиг	100	131	Величина не определена из-за нехватки усилия пресса; деформация 36%

Наличие в ЛКМ в значительном количестве железа и углерода, являющихся восстановителями для меди, создает предпосылки для применения смазок, реализующих избирательный перенос и явление безызносности за счет образования на поверхности трения сервовитной пленки меди, резко снижающей коэффициент трения [4]. Для повышения прочностных свойств и усиления процесса образования сервовитной пленки бронза легируется сильным восстановителем – кремнием. В этом случае происходит физико-химическое взаимодействие армирующих элементов с матрицей, со сложным механизмом растворения и диффузии [5].

В результате образуется новая структура (рис. 2), обладающая механическими и эксплуатационными свойствами, отличными от свойств компонентов, входящих в состав композиции.

Часть узлов трения работает при температуре выше 200°C, поэтому бронзовую матрицу необходимо легировать элементами, обеспечивающими высокие прочностные свойства при повышенной температуре. Одним из них является марганец [6]. Кроме того, в парах трения применялись смазки, обеспечивающие избирательный перенос. Следует отметить, что в этом случае, по-видимому, также реализуется явление безызносности, так как наблюдается аномально низкий коэффициент трения. В настоящее время

проходит промышленное опробование подшипника скольжения на базе такой легированной бронзы с наружным диаметром 760 мм и массой 400 кг.

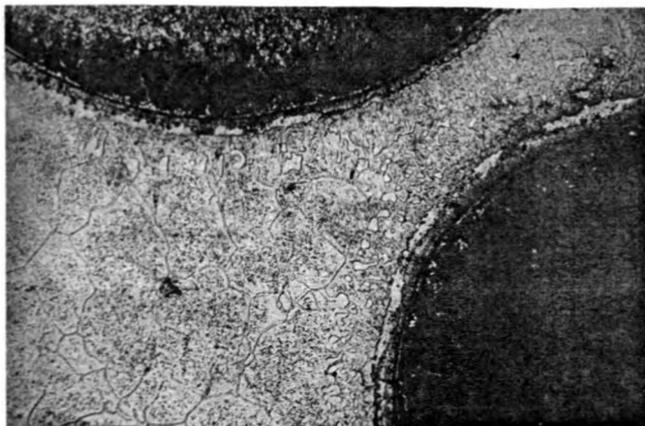


Рис. 2. Структура ЛКМ после легирования кремнием

Некоторые узлы трения работают с жидкой минеральной смазкой в условиях граничного трения. В этом режиме смазки основная цель – уменьшение износа и снижение коэффициента трения, однако избирательный перенос при использовании такой смазки невозможен. ЛКМ благодаря наличию железоуглеродистых гранул можно подвергнуть термообработке (для повышения физико-механических свойств). При этом гранулы приобретают мартенситную структуру, а коэффициент трения и интенсивность изнашивания при испытаниях снижаются.

Часто необходимо обеспечить длительную работу узла без пополнения смазки. Для этого возможно применение химико-термической обработки – сульфидирование рабочей поверхности подшипника или гранул перед помещением в форму. В любом случае повышается противозадирная стойкость и уменьшается изнашивание. Причем в отличие от стандартных материалов в ЛКМ возможно объемное размещение сульфидированных частиц, а матрица будет оставаться прежней. Таким образом, в разрабатываемых ЛКМ для триботехнических целей благодаря особенностям их получения и строения, применению термообработки (в том числе и ХТО) можно обеспечить такие прочностные и антифрикционные свойства, которые нельзя получить для обычных триботехнических материалов.

Еще одно перспективное направление развития ЛКМ – создание материалов для условий интенсивного абразивного изнашивания и работы в узлах трения при высоких температурах (до 550°C) в паре с материалами высокой твердости. Для работы при высокой температуре возможно применение материалов с матрицей из серого чугуна или легированных бронз,

армированных гранулами из высокохромистого чугуна. Для контртела из релита или материала с высокой твердостью могут применяться ЛКМ с армирующими элементами из ВК, из сталей, подвергнутых ХТО (борирование и др.), специальных чугунов. В условиях интенсивного абразивного изнашивания возможно использование ЛКМ с армирующими элементами из ВК и матрицы из высокохромистого чугуна, бронзы. Если кроме абразивного изнашивания возможен наклеп, то в качестве матрицы используется износостойкая наклепывающая сталь. Практика применения такого материала на базе ВК и обычной бронзы показала, что стойкость детали из ЛКМ такая же, как и при наплавке детали сталью 65Г. На рис. 3 показана структура ЛКМ, содержащего в качестве армирующей фазы частицы твердосплавного материала ВК.



Рис. 3. Структура ЛКМ с содержанием частиц твердосплавного материала ВК

Технология получения ЛКМ позволяет восстанавливать рабочую поверхность детали. В отличие от повышения твердости только поверхностного слоя при ХТО, наплавке или пайке пластины из ВК в литых композиционных материалах свойства сохраняются на всю глубину детали.

Таким образом, основными направлениями по дальнейшему развитию литых композиционных материалов являются:

- 1) использование различных легирующих элементов бронзовой матрицы для работы со смазками, реализующими эффект избирательного переноса в узлах трения;
- 2) термообработка или химико-термическая обработка ЛКМ для повышения эксплуатационных и антифрикционных свойств;
- 3) создание материалов для работы в условиях абразивного изнашивания и высоких температур на базе армирующих элементов из ВК, высокохромистого чугуна с матрицей из специальных сталей, чугунов, бронз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Батышев А. И. Литые композиционные материалы с металлической матрицей: Обзор. информ. // Новые материалы, технологии их производства и обработки: Новости науки и техники в ВНИИТИ АН СССР. – М., 1991. – Вып. 2. – 52 с.

2. Исследование физико-механических и трибологических свойств композиционных материалов для тяжело нагруженных узлов трения / А. С. Калининченко, В. И. Жорник, В. А. Верещагин, Н. Е. Гильнич // Порошковая металлургия. – 1999. – Вып. 22. – С. 24 – 29.

3. *Kalinichenko A. S., Kezik V. A., Bergmann H. W.* Structure of Surface Layers of Metal Matrix Composites // *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik.* – 1999. – Vol. 30. – P. 136 – 144.

4. Избирательный перенос в тяжело нагруженных узлах трения / Под общ. ред. Д. Н. Гаркунова. – М.: Машиностроение, 1982. – 207 с.

5. Литые композиционные материалы с макрогетерогенной структурой / А. Г. Анисович, К. Э. Барановский, А. С. Калининченко и др. // *Литье и металлургия.* – 2001. – № 2. – С. 133 – 139.

6. *Смирязин А. П., Смирязина Н. А., Белова А. В.* Промышленные цветные металлы и сплавы. – М.: Металлургия, 1974. – 482 с.

УДК 621.746.047

И. В. ЗЕМСКОВ, канд. техн. наук, **Г. И. СТОЛЯРОВА**,
И. К. ФИЛАНОВИЧ, **К. В. КОРОЛЕВ** (БНТУ)

РЕЦИКЛИНГ ЖАРОПРОЧНОЙ СТАЛИ 35Х23Н7С

Предприятия цементной промышленности используют высокотемпературные проходные печи с конвейерами, детали которых изготовлены из жаропрочной стали 35Х23Н7С. Детали должны иметь высокий уровень механических свойств и высокую стойкость при температурах 900 – 1000°С. Сталь 35Х23Н7С не стандартизована, выпускается в России в ограниченных объемах (по заказам предприятий).

Для замены вышедших из строя деталей конвейера производится закупка проката и изготовление из него деталей. Образующиеся отходы в виде изношенных деталей собираются и сдаются во «Вторчермет» или обмениваются на прокат аналогичной марки в соотношении 1:10. С учетом транспортных затрат такой способ приобретения материала является дорогостоящим. В значительной степени облегчить ситуацию с запчастями, изготовленными из стали такой марки, позволит комплексная технология ее рециклинга, разработанная в НИЛ прогрессивных технологических процессов производства отливок из черных и цветных сплавов кафедры «Металлургия литейных сплавов» БНТУ.

Сталь, легированная хромом, никелем и кремнием (табл. 1), относится к мартенситному классу, имеет высокие жаропрочность и жаростойкость в интервале 1000 – 1050°С.

Высокую жаростойкость стали придает совместное легирование хромом и кремнием, которые имеют большее сродство к кислороду, чем железо. В процессе окисления на поверхности стали образуются плотные оксиды Cr₂O₃, SiO₂, сквозь которые диффузия происходит с трудом. Такая