



*There are investigated the specific features transformation in the composite materials of macro-heterogeneous structure during dry friction. There are shown some common peculiarities of the structure formation during high and low speed dry friction without any lubricant.*

В.Я. КЕЗИК, А.С. КАЛИНИЧЕНКО, Р.К. ИВАНОВА, БНТУ

УДК 620.22

## ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНОГО ОБЪЕМА ЛИТЫХ МАКРОГЕТЕРОГЕННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ НИЗКОСКОРОСТНОГО ТРЕНИЯ БЕЗ СМАЗКИ

Для литых макрогетерогенных композиционных материалов (ЛМКМ) в условиях трения без смазки со скоростями скольжения более 1 м/с в приповерхностном объеме выявлено образование структурированного тела толщиной до 900 мкм. Его формирование является результатом последовательного изменения исходной структуры в условиях высоких давлений, температур, диффузионного обмена и окислительно-восстановительных реакций, усиленных электрохимическим взаимодействием [1–3]. В то же время для ряда металлов и сплавов в условиях сухого трения, но при более низких скоростях скольжения, установлено образование приповерхностного объема без послойного структурирования и уменьшения деформации по глубине. Деформирование материала сопровождалось фрагментированием исходных зерен и разворотом фрагментов по механизму ротационного движения, что создавало трибоконтактный слой, изменяющий условия скольжения и износа [4, 5].

В связи с изложенным возник вопрос о соответствии установленного механизма трения ЛМКМ всему диапазону скоростей и нагрузок. Поскольку знание кинетики изменения исходной структуры необходимо для целенаправленного управления свойствами трибоматериала, была изучена структура ЛМКМ на различных стадиях процесса трения без смазки с низкими скоростями скольжения.

Для исследования был выбран материал на основе медно-марганцево-кремниевой матрицы, близкой по составу эвтектике квазибинарного разреза  $\text{Cu-Mn}_5\text{Si}_3$  тройной системы, которая была армирована литой железуглеродистой дробью. Выбор матрицы обусловлен термостабильностью сплавов эвтектического класса, что должно было обеспечить ее стабильность до температур 998–1048 К [6].

Трение образцов проводили на установке 2070 СМТ-1 по схеме вал–вкладыш. Вкладыши-образ-

цы из ЛМКМ с поверхностью трения, обработанной до шероховатости  $R_{\text{max}} = 1,4$  мкм и электрополированной до шероховатости  $R_{\text{max}} = 0,6$  при  $R_a = 0,065$  мкм, контактировали с полым валом из стали 40Х твердостью 5260 МПа (54HRC<sub>3</sub>), поверхность которого была обработана до шероховатости  $R_{\text{max}} = 1,72$  при  $R_a = 0,32$  мкм. Такое первоначальное соотношение шероховатостей должно было обеспечить реализацию схемы трения «шероховатой по абсолютно гладкой поверхности», когда истирается только последняя [7].

В ходе испытаний триботехнические свойства образцов не исследовали, так как они подробно освещены в литературе. Характеристики процесса трения учитывали в той степени, в которой протекал стабильный режим. Резкое изменение коэффициента трения может свидетельствовать об изменении структуры ЛМКМ и необходимости ее исследования. Во всех остальных случаях образцы исследовали через равные промежутки (500 м) пути трения (15 тыс. м). На основании резкого увеличения коэффициента трения до 0,3–0,4 нижний предел скорости вращения вала был ограничен 0,3 м/с. Верхний предел, равный 0,8 м/с, был задан предыдущими испытаниями [2, 4]. Поскольку в контрольных образцах существенных различий в структуре при 0,3 и 0,8 м/с обнаружено не было, все остальные образцы истирались со скоростью 0,5 м/с. Нагружение образцов проводили ступенчато от 500 до 4500 Н, что соответствовало начальному номинальному давлению 2,05, 6,20, 10,2, 14,35, 18,48 МПа. Для минимизации разогрева образца вал охлаждали проточной водой. Температуры нагрева образцов контролировали термопарой ХА, установленной на расстоянии ~1 мм от поверхности трения внутри образцов. Структуру образцов исследовали на микроскопах Neofot BS-500, РЭМ SCG. Данные меры позволили существенно уменьшить влияние механической обработки на структуру ЛМКМ.

В исходном состоянии композит представляет собой зернистую матрицу, в которой относительно равномерно распределены армирующие гранулы. Размер зерен матрицы колебался от 60 до 150 мкм. Собственно зерно – это смесь кристаллов твердого раствора и интерметаллидов, окаймленная твердым раствором марганца и кремния в меди (рис. 1).

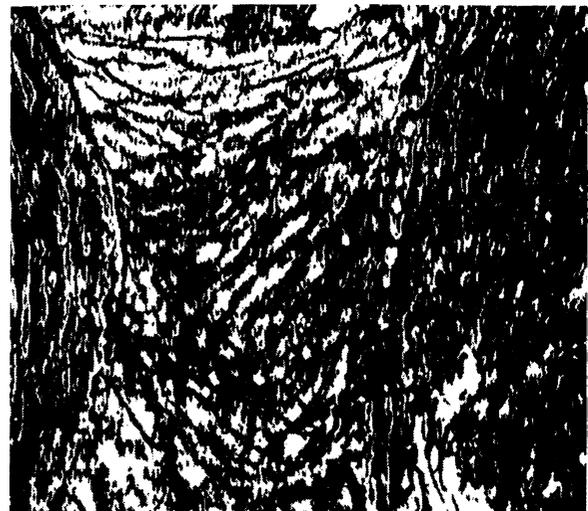
После 10–30 мин испытания поверхность образцов покрывается серо-желтой пленкой. При нагрузке 500 Н на поверхности образцов формируется очень тонкая пленка красноватого оттенка, через которую различаются элементы структуры. После удаления пленки на поверхности образцов проявляется исходная и разрушаемая первичная структура (рис. 2, а). Деформация композита сосредоточена в матрице и только частично захватывает гранулы. На поверхности трения матрицы можно различить полосы скольжения и двойникования (рис. 2, б, в и 3).



Рис.1. Исходная структура ЛМКМ. х30



а



б



в

Рис. 2. Поверхность трения ЛМКМ при нагрузках: а – 500 Н. х250; б – 2500 Н. х100; в – 4500 Н. х100

Представление об интенсивности и глубине деформирования исходной структуры дают поперечные косые шлифы вдоль направления скольжения. Глубина разрушения первичной структуры достигает 250 мкм и более. В отдельных зернах увеличивается содержание твердого раствора в

направлениях скольжения на поверхности и из глубины образцов по направлению к поверхности. Видны также зерна с двойниками на относительно равном расстоянии от поверхности (рис. 4). Количество тех и других растет при увеличении времени трения.

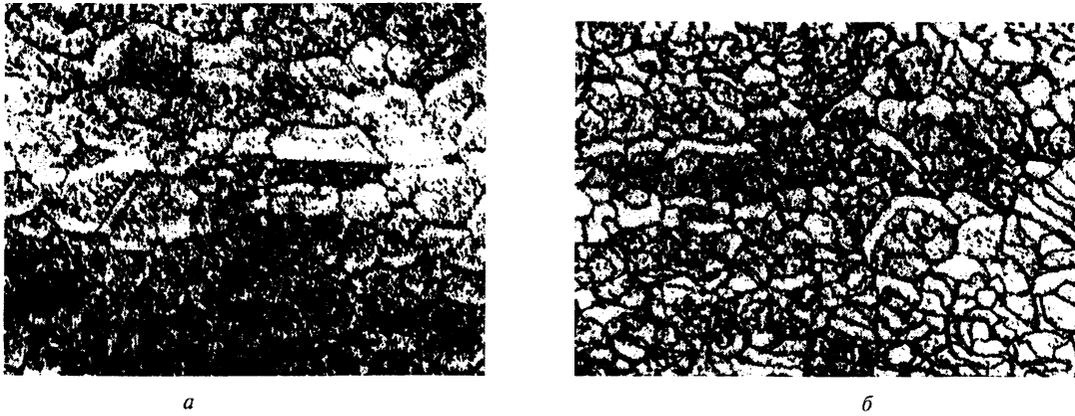


Рис. 3. Поверхность трения ЛМКМ: *a* – нагрузка 2500 Н; *б* – нагрузка 4500 Н. РЭМ.  $\times 275$

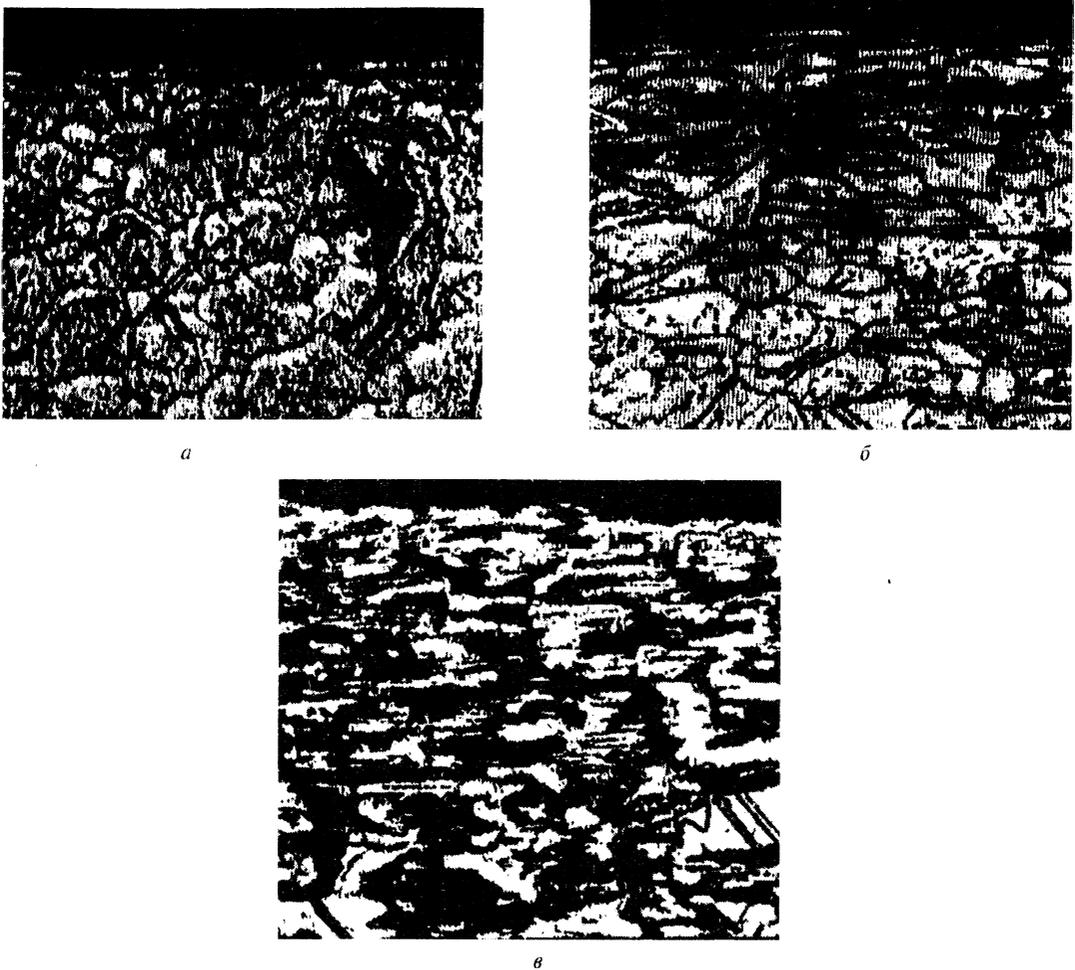


Рис. 4. Поперечное сечение образцов вдоль направления скольжения при различных нагрузках: *a* – 500 Н; *б* – 2500; *в* – 4500 Н. Косой шлиф. РЭМ.  $\times 225$

На рис. 5 показаны микроструктуры участков ЛМКМ на глубине 90–120 мкм параллельно поверхности трения, а на рис. 6 – на глубине 1,8 мм. Нагрузка составляла 2500 и 4500 Н.

С приближением к поверхности структура матрицы изменяется. Разрушенные и искаженные фрагменты исходной структуры образуют новую зернистую структуру, чему способствуют накопленные дефекты. Затем процесс разрушения и восстановления повторяется снова. При этом в

направлении к поверхности начинают накапливаться точечные дефекты. На рис. 7 приведены характерные структуры, отражающие указанные изменения в слое толщиной 10–15 мкм на расстоянии 20–25 мкм от поверхности.

Результаты экспериментов позволяют отметить, что при низкоскоростном трении без смазки формирование структуры ЛМКМ на каждой стадии определяется развитием диффузионных процессов в условиях объемно-напряженного со-



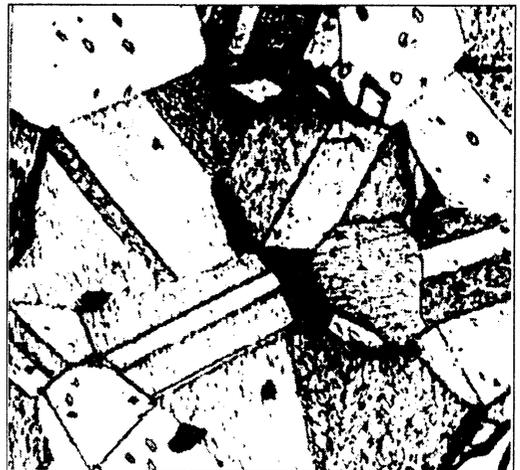
*a*



*б*



*в*



*г*

Рис. 5. Структура матрицы на глубине 90–120 мкм после прохождения пути трения: *a* – 1000 м; *б* – 2000 м и при нагрузке 2500 Н. РЭМ. х550; *в* – 1000 м; *г* – 2000 м и при нагрузке 4500 Н. РЭМ. х550



*a*



*б*

Рис. 6. Структура матрицы на глубине 1,8 мм после прохождения пути трения 1000 м при нагрузке 2500 Н. Неофот. х500

стояния и сдерживания пластической деформации матрицы армирующими элементами. На это указывает характер перераспределения твердого раствора на основе меди и эвтектической смеси, в первую очередь интерметаллидов; перестройка границ зерен и их миграция; разрушение зерен и

структурирование в качественно ином составе; рост числа дефектов и их направленная миграция.

Известно, что в композитах сдерживание пластической деформации проявляется тем сильнее, чем меньше расстояние между армирующими элементами, а перераспределение напряжений –

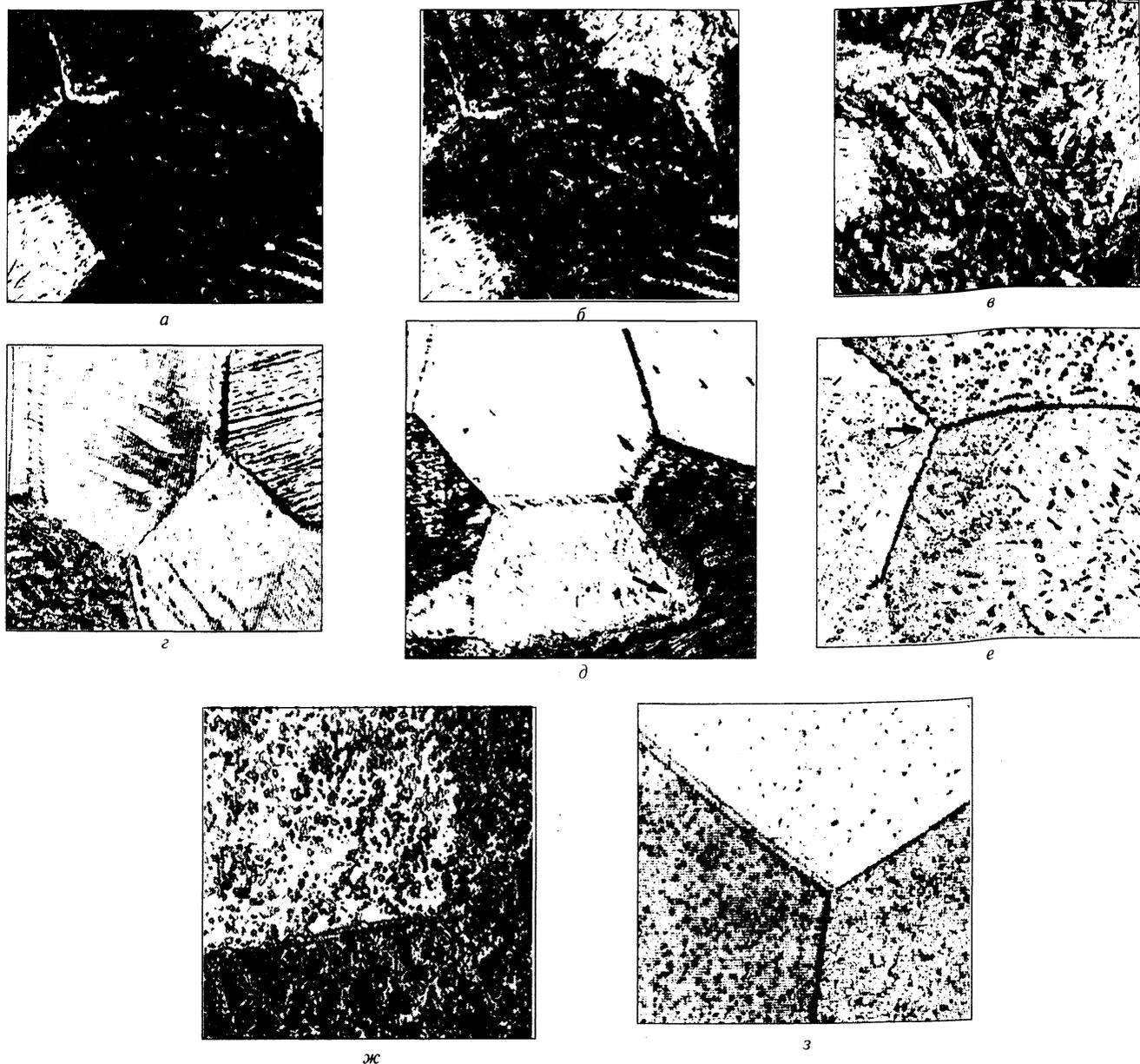


Рис. 7. Микроструктура матрицы при нагрузке 2500 Н после прохождения: а – 1000 м; б – 2000 м; в – 4000 м; г – 5000 м; д, ж – 5500 м; е, з – 6500 м. РЭМ. а–е –  $\times 1250$ ; ж–з –  $\times 4380$

одно из основных свойств матричных гетерогенных структур [9]. В рассмотренных условиях оно проявляется в изменении структуры матрицы в направлении скольжения. Появление зерен, расположенных на большой глубине от поверхности трения с характерными полосами скольжения, свидетельствует о преобразовании в ЛМКМ объемно-напряженного состояния. Следы двойникования также могут указывать на затруднение деформирования. Но вероятное их появление является результатом реализации так называемого кажущегося отжига [8]. Для этого есть все необходимые условия: вибрационная составляющая трения; циклическое нагружение отдельных участков поверхности и материала в целом; отсутствие разогревов материала (температура образцов не поднималась выше 413 К); образование

избыточного числа вакансий и их направленная миграция, т.е. работа ЛМКМ по усталостному механизму.

Миграция вакансий усиливает диффузионный поток атомов во встречном направлении. Следовательно, от поверхности в глубь, в первую очередь, будет диффундировать кислород, чему также способствуют подвижные границы и скопления линейных дефектов. Это создает хорошие условия для развития окислительно-восстановительных реакций. Очевидно, что появление округленных светлых в электронном излучении включений в теле зерен – результат образования оксидов.

Накопление вакансий даже без аннигиляционного взаимодействия с дислокациями способно понизить предел текучести и пластифици-

ровать металл [8]. В этом можно усмотреть подобие процессов, сопровождающих низко- и высокоскоростное трение ЛМКМ. С этим же, а не с ротационным движением может быть связано образование трансформированных и трудноразрушаемых пленок на поверхности исследованных образцов. Однако для окончательного ответа необходимы дополнительные исследования. В пользу ротационного движения ЛМКМ можно трактовать факт фрагментирования первичной структуры и интенсификацию массопереноса. Но против — отсутствие высоких температур, сопровождающих сверхпластичное течение мелкозернистого материала или ползучесть, в которой этот тип движения исследовался. Кроме того, движение по схеме сдвиг—поворот приводит к увеличению внутреннего трения с ростом дефектности структуры и нагрузки истирания [4]. Но в проведенных экспериментах этого не наблюдалось.

Опыты по трению композитов позволили установить ряд общих факторов в формировании структуры приповерхностных объемов ЛМКМ при низких и высоких скоростях скольжения. Однако для полной идентификации механизмов необходимы дополнительные эксперименты хотя бы потому, что ряд условий (затрудненная деформация, перераспределение напряжений, глубина

распространения напряжений) в высокоскоростном трении ЛМКМ не исследовали.

### Литература

1. Kezik V., Novosadov V. Tribotechnical Metal Matrix Composites // Proc. of the 2<sup>nd</sup> Japan SAMPE Conf. Chiba, Japan. 1981. P. 201–204.
2. Kalinichenko A.S., Kezik V.Ya. Macro-heterogeneous Casted Composite Materials: Structure of Surface Layers // «Advanced Technologies for Materials Processing & Repairing of Worn-out Parts». Minsk, 1996. P. 130–141.
3. Kalinichenko A.S., Kezik V.Ya., Bergmann H.W., Kalinichenko V.A. Structure of surface layers of metal matrix composites // *Materialswissenschaft und Werkstofftechnik*. 1999. Vol. 30. P. 136–144.
4. Колубаев А.В., Тарасов С.Ю. Закономерности формирования поверхностных структур при трении с высокими нагрузками // *Трение и износ*. 1998. Т. 19. №3. С. 379–385.
5. Heilman R., Clark W.A., Rigby D.A. Orientation determination of substrate cells generated by sliding // *Acta Met.* — 1983. Vol. 31. N8. P. 1293–1305.
6. Тиханович В.Н., Коваленко О.И., Лактионов В.А. Литые износостойкие материалы, их разработка и применение. М.: Знание, 1980.
7. Справочник по триботехнике / Под общ. ред. М. Хебда, А. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 1989. Т.1.
8. МакЛин. Механические свойства металлов. М.: Металлургия, 1963.
9. Затуловский С.С., Кезик В.Я., Иванов Р.К. Литые композиционные материалы. Киев: Техника, 1990.



В секретариат БелОЛим поступили каталог публикаций Американского общества литейщиков на 2003 г. и план мероприятий, организуемых обществом на текущий год. Книги, словари, журнальные публикации, аудио- и видеоматериалы и многое другое представлены в таких разделах, как дефекты литья, дизайн отливок и их покупка, отливки — формовка — приготовление стержней, образование и подготовка, литье черных металлов, здравоохранение, безопасность и контроль окружающей среды, человеческие ресурсы, маркетинг и менеджмент, плавка, литье цветных металлов, модельное дело, труды конференций, библиотечное обслуживание и др.

Более подробную информацию и сам каталог можно получить в секретариате БелОЛим.