

А. У. МАРГУЛЕС

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ТВЕРДОФАЗНЫХ МАТЕРИАЛАХ ТИПА «КЕРМЕТ»

Реология, как наука о деформациях и течении вещества, не включает исследований реологических аспектов при движении тела, как целого объекта, а только рассматривает относительное перемещение его частиц. В этой связи полагают, что все тела, встречающиеся в природе в естественном состоянии, а также все продукты производства обладают той или иной степенью текучести [8]. Лучшие сорта стали, находясь под действием достаточно большого напряжения, со временем обнаруживают остаточные деформации, обусловленные необратимым перемещением частиц железа и углерода, т. е. течением вещества. Такие твердые тела, как камни и горные породы также во многих случаях обнаруживают текучесть. Результаты этого легко наблюдать в горах, где пласты горных пород в связи с движением земной коры в процессе пластического течения бывают изогнуты различным образом.

Возникновение реологии относят ко второй четверти XX века, поэтому границы и содержание еще не вполне точно определились. Термин «реология» начал применять Е. Бингам, хотя отдельными реологическими вопросами занимались в свое время М. В. Ломоносов (1751), Д. И. Менделеев (1880), Л. Навье (1822), Дж. Стокс (1845), Дж. Максвелл, У. Томсон, Н. П. Петров (1883), Ф. И. Шведов (1889).

В Советском Союзе в последнее время реология и реологические методы исследования получили быстрое и широкое развитие при исследовании структурно-механических свойств разнообразных технологических материалов (работы Ю. Н. Работнова, П. А. Ребиндера, В. А. Каргина, М. П. Воларовича, Д. М. Толстого, Р. А. Слонимского, Г. В. Виноградова, В. Е. Гуля, И. А. Рогова, А. В. Горбатова, К. П. Гуськова, Ю. А. Мачихина, Л. Н. Лунина и др.).

Реологические явления твердофазных материалов недостаточно исследованы, а прессовки, изготовленные методом порошковой металлургии, в этом направлении еще совсем не изучены.

Порошковые материалы, к которым относится и кермет, характеризуются тем, что объем заполнен твердым материалом не сплошь, а лишь частично (остальную часть объема занимают поры), а также тем, что значения таких свойств, как прочность, твердость, модуль упругости, электропроводность, теплопроводность и некоторые другие, составляют

лишь более или менее значительную долю от соответствующих свойств сплошного твердого материала того же состава.

При прессовании и деформации (консолидации) порошковых тел частицы необратимо деформируются не во всем объеме и не по всей поверхности, а преимущественно в незначительных участках, прилегающих непосредственно к поверхностям взаимного контакта. Поэтому частицы порошковых тел являются в значительной мере индивидуально обособленными и деформируются в некоторой степени независимой (автономно) от других частиц, находящихся в непосредственном контакте с ними. Деформация частиц не воспроизводит в точности деформации порошкового тела, которая происходит в основном за счет изменения объема пор.

Порошковые тела характеризуются ярко выраженным непостоянством объема и в еще большей мере непостоянством степени контакта между структурными элементами и непостоянством свойств при механической деформации и термической обработке.



Рис. 1. Пластически деформированные пластины кермета NC20M:
а) $v = 78$ м/мин; $s = 0,15$ мм/об; $t = 1$ мм; б) $v = 80$ м/мин; $s = 0,15$ мм/об,
 $t = 0,5$ мм.

Свойства спрессованных тел определяются не только свойствами материалов составляющих его отдельных индивидуальных тел (частиц), но и степенью и характером связи и контактом между ними.

Объектом исследования в данной работе был материал, являющийся твердым раствором, содержащим керамику Al_2O_3 — в качестве основы (75%) и сложный металлический карбид типа $(Ti, Mo, W)C$ — 25%, спрессованным при температуре $1880 \pm 20^\circ C$. Такое утверждение сформулировано в итоге ряда исследований:

а) по данным спектрального анализа выявлено, что в составе этого материала: Al — основа; Mo, Ti, Fe, Co — много; Ni, W, Cr — есть; Mn, Si — мало;

б) по данным химического анализа — (в % масс) — Al — 73,52; Mo — 12,12; Ti — 7,46; W — 3,35; Fe — 0,37; Co — 0,08; Ni — 0,032; Cr — 0,016; Mn — 0,01; Si — 0,014; $C_{общ}$ — 3,0;

в) по данным рентгеноструктурного анализа — сплав двухфазный. Основной фазой является $\alpha-Al_2O_3$ и второй фазой — твердый раствор на основе карбида титана, с периодом решетки $a = 4,306 \text{ \AA}$;

г) металлографические исследования подтвердили наличие двухфазной структуры материала.

Состав этого материала, включающий керамическую основу и металлическую часть, позволяет назвать его — керамико-металлическим или сокращенно «керметом».

На первом этапе исследований были выявлены: плотность, твердость, модуль упругости и прочность керметов [7].

Плотность и твердость керметов марок НС20М (производство ГДР) и ВЗ (производство СССР) оказались соответственно равными 4,46; 4,5 — 4,6 г/см³; 91,8; 92—94 (HRA). Плотность керметов США марок А—3,92; Д₁—4,52; Д₂—5,34; С—6,9; Н—3,61 г/см³.

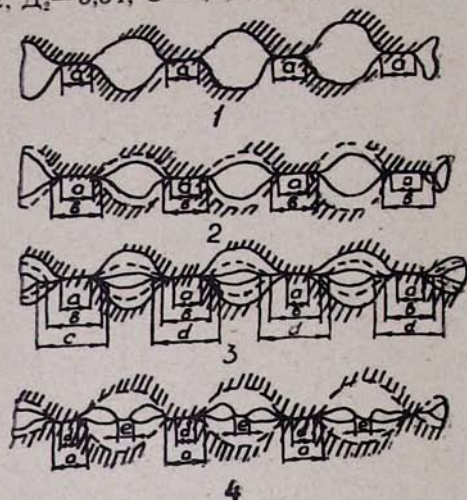


Рис. 2. Принципиальная схема уплотнения керметов при деформации.

Отметим, что керметы легче твердых сплавов. Их достоинством является также то, что твердость снижается наполовину, по сравнению с твердостью при $T=20^{\circ}\text{C}$, только при температуре, превышающей 1200°C .

Численные значения модуля упругости керметов были определены в специально проведенном исследовании с использованием импульсного дефектоскопа ДУК-20. Его величина (36054 кгс/мм²) для кермета НС20М незначительно превосходит среднее значение этого параметра для минеральной керамики ЦМ332 (35870 кгс/мм²).

Предел прочности при поперечном изгибе определялся на образцах, установленных на машине ЦДМУ-30; специальные образцы изготавливались для исследования предела прочности при одноосном сжатии. Предел прочности кермета ВЗ при поперечном изгибе оказался равным 45—70 кг/мм². У некоторых зарубежных промышленных марок керметов прочность колеблется в пределах 30—50, а у отдельных марок достигает 50—80 кг/мм²; предел прочности при сжатии у керметов 280—300 кг/мм² при 20°C (150 кг/мм² при 400°C и 50 кг/мм² при 1200°C). Для сравнения можно сообщить, что быстрорежущая сталь утрачивает свою исходную прочность при $T=500^{\circ}\text{C}$, а твердые сплавы при 700°C .

Исследована прочность пластин кермета HC20M, подвергнутых в лаборатории высоких давлений Института физики металлов АН СССР (г. Свердловск) обдавлению жидкостью при давлении 17 тыс. атм. в условиях применения оболочки и без нее, а также не подвергавшихся обдавлению. Испытания, проведенные на разрывной машине УММ, не выявили существенных различий в прочностных характеристиках обдавленных и необдавленных пластин.

Металлографические исследования показали некоторое изменение упаковки зерен, выразившееся в изменившемся количестве зерен на площади, равной 1 мм². У обдавленных пластин кермета HC20M оно составило 47393, у необдавленных — 46296; в измененной сумме протяженности линий границ зерен по поверхности шлифов в 1430 мм/мм², соответственно равных 296 и 246, и в ориентированности карбидных зерен по боковой поверхности — 42; 98 и 24,5; 93 мм/мм².

Керметы HC20M, ВЗ — пористы — в HC20M 0,8% площадь поля шлифа по кромке имеет пористость; имеются отдельные поры, соответствующие 13 мкм. У ВЗ — 0,1% в сердцевине и 0,4% площади шлифа по кромке с порами.

А. Я. Перас и В. И. Даукнис указывают, что характер влияния пористости на прочность существенно зависит от величины прочностной однородности материала. Материалы с высокой степенью однородности разупрочняются значительно интенсивнее, чем неоднородные. Физическая сущность этого явления легко объяснима на основе известных положений гипотезы «слабого звена». Действительно, в материале с однородным распределением микродефектов наличие уже нескольких очагов концентрации напряжений в виде пор приводит к тому, что опасный микродефект попадает в зону повышенных напряжений и вызывает разрушение образца. Наоборот, в материале неоднородном существенное влияние на прочность может оказать лишь наличие в образце значительных по величине объемов материала с повышенными напряжениями. С этих же позиций понятен и тот факт, что по мере увеличения пористости происходит сближение значений прочности материала с различными параметрами прочностной неоднородности. Поэтому наличие пористости у керметов — материалов относительно неоднородных — не является параметром снижающим их прочность.

Показателем удовлетворительности структуры считается мелкозернистость кермета. Вязкость кермета можно оценить по излому: если он имеет несколько раковистый вид, то это признак, сравнительно хорошей вязкости материала, если же, наоборот, поверхность излома совершенно гладкая, то это может служить также признаком слишком высокой хрупкости.

Реологические особенности пластин кермета, подвергшихся силовому и тепловому воздействию, изучались на микрошлифах и репликах с пластин керметов с использованием металлографических микроскопов МИМ-7, МИМ-8, электронного ЭП-7, микроанализатора J. X. A. ЗА (Япония) и ДРОН-1. Результаты силового исследования при нагруз-

ках 40, 60 и 100 кГ, постепенно увеличивающихся на 8 кГ, показали при увеличении $\times 900$ незначительные линейные отклонения отпечатков, нанесенных уколами пирамиды прибора ПМТ-3 на поверхность микрошлифа. Микроисследования этих поверхностей при увеличении $\times 3150$ выявили микроразрушения в зоне уколов в оксидной массе. Карбидные составляющие изменениям не подверглись.

При исследовании под действием тепловой нагрузки (трехкратный нагрев до 800°C в печи и выдержке в течение 15 мин и последующее охлаждение) было выявлено уменьшение четкости границ зерен, хорошо заметных в исходном до нагрева состоянии.

Многократные силовые нагружения пластин, нагретых при температурах 300, 400, 500, 600, 700, 800°C и выдержанных в течение 10 мин, постоянной нагрузкой в 80 кГ, также в течение 10 мин во время остывания при наблюдениях под микроскопом МИМ-8 ($\times 700$) и ЭП-7 ($\times 11800-30200$) показали, что многочисленные поры, обнаруживаемые в исходном состоянии, несколько уменьшаются. Результаты исследований позволили предположить, что при внешнем силовом и тепловом воздействиях на прессовки, которыми являются пластины керметов, возможно микротечение частиц составляющих компонентов, что положительно сказывается на повышении прочности этих материалов за счет более плотной упаковки входящих в их состав компонентов. Это обстоятельство явилось важным положением для объяснения повышенной прочности этих материалов при их прямом использовании при резании металлов. Полученные результаты исследования вместе с тем послужили хорошей предпосылкой для последующих более тонких экспериментов в этой области.

Внешне обнаруживаемая пластическая деформация прессовок твердосплавных и, тем более, керамических материалов довольно редкое явление. Однако известно, что при алмазном шлифовании твердых сплавов в результате увеличения мгновенных удельных давлений, вызванных внешними условиями, повышается локальная температура и на электронных фотографиях ($\times 10000$) наблюдаются пластические сдвигообразования, высота которых находится в пределах сотых долей микрометра [4]. Если частота теплосмен и возникающая температура увеличиваются, то также наблюдается пластическое течение, но высота этих сдвигов соответствует нескольким десяткам ангстрем, т. е. пластическая деформация локализуется в более тонком слое. Наблюдалось также пластическое течение и керамических режущих материалов [3].

В исследованиях с керметом НС20М в диапазоне скоростей 75—80 м/мин при резании стали 40Х также выявлена пластическая деформация его режущей кромки, выраженная в опускании режущей кромки и вершины резца. Зарисовки двух оригинальных случаев представлены на рис. 1.

На первый взгляд может показаться необычным наличие пластической деформации такого хрупкого материала, как кермет. Однако следует учесть, что понятия хрупкость и пластичность относительны и за-

висят от характера нагружения, температуры и длительности испытания. Хрупкое тело можно привести в пластическое состояние (например, созданием схемы трехосного равного сжатия), а любое пластическое тело — в хрупкое (например, созданием схемы трехосного равного растяжения, кратковременным нагружением). Исследования П. Бриджмена и Т. Кармана показывают, что такие хрупкие материалы, как чугун, мрамор, корунд и др., в условиях гидростатического давления проявляют пластические свойства. Ф. Боуден [2] также экспериментально установил, что деформации каменной соли при скольжении являются преимущественно пластическими, а хрупкость не проявляется. В этом случае поведение каменной соли напоминает поведение металлов. В процессе резания кромки режущего элемента обволакивается обрабатываемым материалом и создается контакт как на передней, так и на задней поверхности, развиваются значительные контактные давления и кромка находится в условиях трехосного сжатия. Уменьшению хрупкости в значительной степени способствует локальный разогрев режущей части инструмента при высоких скоростях резания [5].

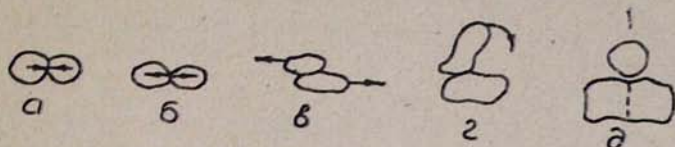


Рис. 3. Схемы размещения частиц кермета при деформации: а) сближение частиц; б) удаление частиц; в) скольжение частиц; г) вращение частиц; д) перемещение и подразделение частиц.

Основываясь на проведенных экспериментах условную схему возможного уплотнения пористого каркаса кермета и контактных явлений при деформации можно представить в несколько упрощенном виде, как это показано на рис. 2 [1].

Исходное состояние 1 материала с принятыми сфероидальными порами и соответствующими им контактными площадками a при деформировании переходит в состояние 2, когда форма пор и качество первоначальных контактных площадок в принципе остаются неизменными. В этом случае заметно изменится только размер пор, что приведет к увеличению площадей существующих контактов от размера a до размера b . Часть дополнительной площади контакта, возникшей в процессе деформации, может оказаться плотной и неплотной. При иной степени деформации состояние 2 может перейти в состояние 3, когда изменятся не только размеры, но и форма пор. Соответственно контактные площадки возрастут от b до c , причем качество контактной площадки $c-b$ можно сравнить с качеством контакта в состоянии 2, а качество контактной площадки b в состоянии 3 значительно повысилось вследствие как окончательного сближения поверхностей, так и выдавливания разных частиц в сторону пор. При сближении чистых металлических поверхностей под действием давлений при резании может происходить холодная сварка с

возникновением контактов, сходных по качеству с контактами *b*. При значительных степенях деформации высокопористых пластин может возникнуть и состояние 4, характерное тем, что наряду с возникновением новых контактов *e*, качество которых определяется степенью деформации возможно частичное разрушение существующих контактов от *a* до *d*. Не исключено, что некоторые контакты, образовавшиеся при спекании или горячем прессовании, разрушаются полностью, а на вновь возникших произойдет холодная сварка. Вследствие неодинаковых размеров пор и контактных площадок в пластинах исходного состояния имеются основания предполагать, что состояния 2—4 чаще будут проявляться при силовом и тепловом воздействиях одновременно. Соотношение этих состояний должно определяться величинами прикладываемых сил температур и исходной пористостью пластин. Следует отметить, что проявляются и иные состояния в пластинах, тем более, что частицы могут перемещаться и хрупко разрушаться (рис. 3).

На основании выполненных исследований можно заключить, что у консолидированных твердофазных материалов, которыми являются прессовки керметов, проявляются подобно, как и у сплошных твердых тел, реологические свойства, имеющие свою специфику, связанную с их строением.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Я. Артамонов. Влияние условий обработки на физико-механическое состояние металлокерамических материалов. Киев, 1965.
2. Ф. Боуден и Д. Тейбор. Трение и смазка твердых тел. М., 1968.
3. А. М. Вульф. Резание металлов минералокерамическими резцами. Л., 1958.
4. Качество поверхности, обработанной алмазами. Под ред. В. Н. Бакуля. Киев, 1972.
5. Т. Н. Лоладзе. Износ режущего инструмента. М., 1958.
6. А. У. Маргулес. Явления на контакте сталь—кермет. Сб. «Прогрессивные технологические процессы в машиностроении. Сборник научных трудов», № 85, Кемерово, 1976.
7. А. У. Маргулес. Чистовое точение сталей керамико-металлическими резцами. Кемерово, 1972.
8. М. Рейнер. Деформация и течение (Введение в реологию). М., 1963.