

цесса нанесения графитовых покрытий. Все это приходится учитывать при разработке конкретной технологии нанесения углеродных покрытий.

Итак, катодное пятно вакуумной дуги графита является мощным источником микрочастиц графита и потоком ионов углерода. Этот комплексный источник был нами использован для нанесения графитовых покрытий на стружечный материал системы Al-Cu-Mg-Si. Результаты экспериментальных исследований показывают, что это позволяет достаточно легко равномерно распределить включения по объему получаемого композиционного материала и с точностью до 0,1 мас.% регулировать содержание графита в материале. В целом, такой метод получения композиций алюминиевый сплав-графит экономически целесообразен при содержании графита не более 5 мас.%.

Таким образом, проведенные исследования дали возможность разработать основы технологии качественного введения добавок графита в композиционные антифрикционные материалы на основе алюминиевых сплавов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 643РБ МКИ С 22 С 1/03, С 22 С 21/00, В 22 F 1/00 Композиционный материал и способ его получения /А. Т. Волочко, О. Е. Жданович, А. П. Ласковнев и др. Заявл. 09.12.1992. Опубл. 30.06.95.
2. Овчинников В. В., Ласковнев А. П., Волочко А. Т., Макарова Ж. Е. //Литье и металлургия. 2000. №1. С.45-46.
3. Мрочек Ж. А., Эйзнер Б. А., Марков Г. В. Основы технологии формирования многокомпонентных вакуумных электродуговых покрытий. Мн: Наука и техника, 1991. –95с.
4. Вакуумные дуги /Под ред. Дж. Лафферти. М.: Наука, 1982. –345с.
5. Любимов Г. А., Раховский //Успехи физических наук. 1978. Т.125, №4. С. 665-706.
6. Раховский В. И. Физические основы коммутации электрического тока в вакууме. М.: Наука, 1970. –536с.
7. Бейлис И. И., Зекцер М. П., Любимов Г. А. //Журнал технической физики. 1988. Т.58, №10. С.1861-1870.
8. Handbook of Vacuum Arc: Science and Technology /Edited by R. L. Voxman, D. R. Sanders, and Ph. J. Martin. New Jersey, 1995. –765p.
9. Кессаев И. Г. Катодные процессы электрической дуги. М.: Наука, 1968. –235с.
10. Месяц Г. А. Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. М.: Наука, 2000. –424с.
11. Немчинский В. А. //Журнал технической физики. 1982. Т.52, №9. С.1748-1755.
12. Немчинский В. А. //Журнал технической физики. 1985. Т.55, №1. С.60-66.
13. Мойжес Б. Я., Немчинский В. А. //Журнал технической физики. 1982. Т.52, №4. С.684-689.

УДК 669.13 : 629.113.3

*Ласковнев А.П., Покровский А.И., Хроль И.Н.*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ ЧУГУНА ПОСЛЕ ГОРЯЧЕЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

*ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси»  
Минск, Беларусь*

**Введение.** Возникший в течение последних десятков лет интерес к деформированному чугуно вызван рядом причин: 1) за счет деформации изделию придается форма с минимальными припусками для механической обработки (до сотых долей мм); 2) у деформированного чугуна спектр получаемых структур, а значит и возможности управления механическими и эксплуатационными свойствами, гораздо шире, чем у литого чугуна (например, графит приобретает необычную волокнистую форму, а предел прочности при растяжении может достигать 1200-1400 МПа); 3) деформация позволяет регулировать структуру, как во всем объеме заготовки, так и определенной ее части.

**Существующие проблемы в исследованиях:** 1) Физические причины и природа упрочнения чугуна до сих пор полностью не выяснены, 2) Роль структурных факторов в упрочнении неоднозначна, 3) Технологическая направленность исследований опережает фундаментальные знания.

В рамках решения указанных проблем в ФТИ НАН Беларуси (г. Минск) ведутся исследования природы упрочнения чугунов после воздействия горячей пластической деформации.

**Цель данной работы** сравнительные исследования микроструктуры и электросопротивления чугуна в литом и деформированном состоянии.

**Материал и методика исследований.** Первоначальные сравнительные исследования электропроводности проводились на сером, половинчатом, ковком и высокопрочном чугунах. Материалом для дальнейших исследований влияния степени деформации и температуры электросопротивления являлся литой высокопрочный чугун марки ВЧ50, микроструктура которого показана на рис. 1, а, б.

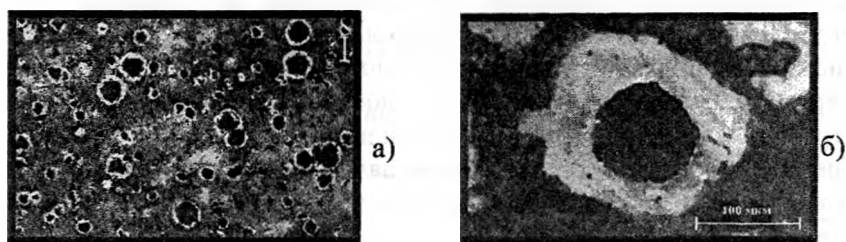


Рисунок 1- Микроструктура исследуемого высокопрочного чугуна в литом состоянии

Высокопрочный чугун подвергали горячей пластической деформации при 900-1000 °С путем выдавливания в контейнере прессы цилиндрической чугунной заготовки через отверстие матрицы (рис. 2.)

В зависимости от степени деформации (от 0 до 80%) получали прутки одинакового диаметра и различной длины, которые охлаждали на воздухе. Из прутков вырезали продольные и поперечные образцы для исследований (рис. 3).

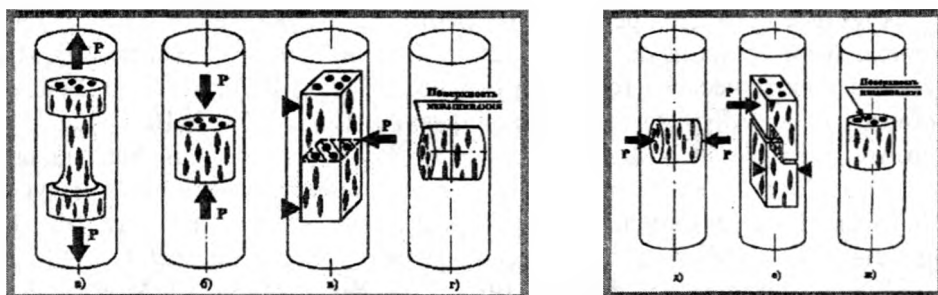


Рисунок 3 - Схема вырезки образцов для механических испытаний: а) растяжение; б, д) сжатие; в, е) ударную вязкость; г, ж) износостойкость

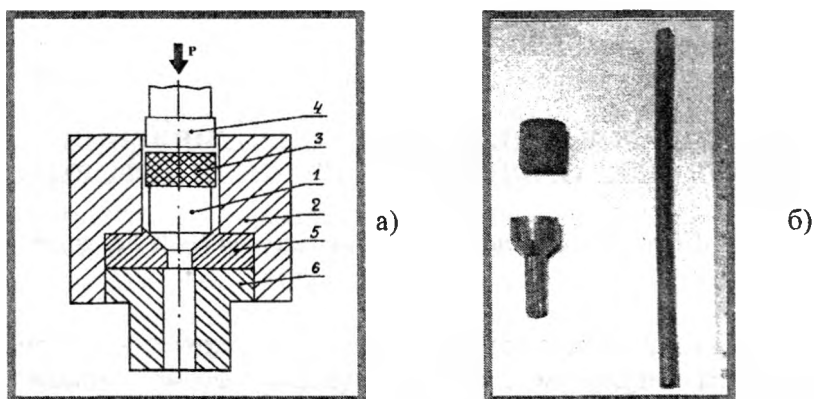


Рисунок 2- (а) – принципиальная схема пластической деформации чугуна выдавливанием: 1-чугунная заготовка, 2-5 детали штамповой оснастки; (б) - стадии выдавливания: исходная заготовка, пруток с прессостатком и пруток, выдавленный на проход

### Результаты экспериментов и их интерпретация.

**Результаты исследований микроструктуры высокопрочного чугуна.** Наибольшие изменения в форме графита после горячего выдавливания происходят в продольном направлении (рис. 4, а - в). Когда графит только начинает деформироваться, он приобретает эллипсообразную форму с заострениями по концам. В его сечении сохраняется лучистая структура, характерная для сферических включений высокопрочного чугуна. Следующей важной стадией трансформации графита является образование в центральной части включения ромбообразного утолщения и превращение заострений по его краям в нитеобразные ответвления. Это свидетельствует о том, что деформация графита проходит как по сдвиговому механизму (в центральной части включения), так и пластическим течением (по краям). В поперечном сечении (рис. 4, г - е) наблюдается значительное умень-

шение размеров графита от величины ШГд45 в литом состоянии до ШГд15 у деформированного со степенью деформации( $\epsilon$ ) 80%. Начиная с  $\epsilon=60\%$ , заметно появление новых мелких графитных включений.

В литом состоянии включение графита округлой формы и свободно расположено в воронке (расстояние до стенок 0,3 от диаметра включения). Поверхность включения, образована перекрывающимися друг друга чешуйками, напоминающими листья в капустном кочане. В деформированном чугуна включение приобретает неправильную округлую форму, а на его поверхности заметно углубление в виде концентрически сходящейся к вершине включения спирали. Вероятно,

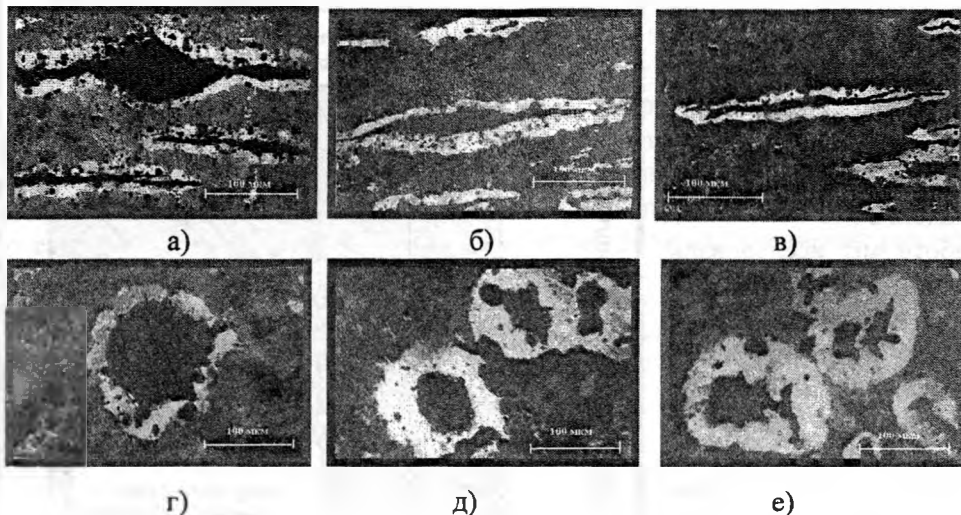


Рисунок 4 - Видоизменение формы графита после пластической деформации по мере увеличения ее степени в продольном (а - в) и поперечном направлениях (г-е)

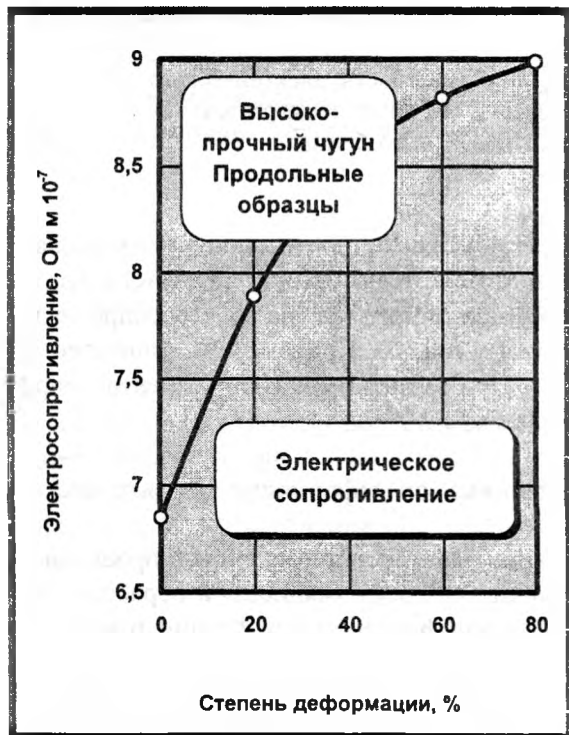


Рисунок 5 - Зависимость электросопротивления от степени деформации. Испытания при комнатной температуре

пластическое деформирование графита развивалось путем перемещения спиралевидных дислокаций. В деформированном чугуна расстояние от края включения до стенок не превышает 10% от диаметра всего включения. Поверхность включения, как и в литом состоянии, образована чешуйками, но их размер в 2-3 раза меньше. Иногда на поверхности можно наблюдать пластическую деформацию в виде многочисленных концентрически сходящихся к центру следов сдвигов чешуек графита.

#### Результаты исследований электрического сопротивления

Электрическое сопротивление чугуна (рис. 5) является структурно чувствительной характеристикой и определяется количеством и морфологией включений, а также соотношением фаз в металлической матрице.

Чем большее количество графита присутствует в структуре и компактнее форма графита, тем меньше электрическое сопротивление чугуна. Поэтому исследуемые чугуны в литом состоянии в порядке уменьшения электрического сопротивления располагаются следующим образом.

Наибольшие значения электросопротивления ( $8,5 \cdot 10^{-7}$  Ом·м) у половинчатого чугуна, что

объясняется наличием в структуре как цементитных включений, так и графита разветвленной формы. У серого чугуна значения электросопротивления несколько меньше ( $7,9 \cdot 10^{-7}$  Ом·м). Чугуны с компактной формой графита характеризуются самыми низкими значениями электросопротивления: высокопрочный -  $6,8 \cdot 10^{-7}$  Ом·м, ковкий -  $4,6 \cdot 10^{-7}$  Ом·м.

Деформационная обработка чугуна влияет на электросопротивление двояким образом. С одной стороны, увеличение в структуре металлической матрицы дефектов кристаллического строения повышает электросопротивление. С другой стороны, воздействие деформации приводит к вытягиванию графитной (самой токопроводящей) составляющей структуры чугуна.

Например, у высокопрочного чугуна в зависимости от степени деформации ( $\epsilon$ ) форма графитных включений изменяется от шаровидной ( $\epsilon=0\%$ ) к эллипсообразной ( $\epsilon=40-60\%$ ) и нитевидной ( $\epsilon=80\%$ ) в продольном направлении, а в поперечном сечении графит сохраняет компактную форму. Поэтому значения электросопротивления будут сильно зависеть от направления течения металла при деформации. Возникновение такой ориентированной структуры уменьшает электросопротивление.

В данной работе мы исследовали влияние горячей пластической деформации на электросопротивление образцов из высокопрочного чугуна, вырезанных вдоль направления деформирования. Для приведения металлической матрицы литого и деформированного чугуна к единообразному состоянию, отливку подвергали нагреву и охлаждению по режиму деформированных заготовок. После охлаждения на воздухе металлическая матрица состояла из перлита (80-90%) и феррита (10-20%). Зависимость, представленная на рис. 5 свидетельствует о росте сопротивления с увеличением степени деформации.

Таким образом, при данных параметрах деформационной обработки чугуна фактор наклепа металлической матрицы преобладает над фактором ориентации графита.

С увеличением температуры от 20 до 1000°C электрическое сопротивление чугуна возрастает (рис. 6), что объясняется увеличением подвижности атомов. В частности, для литого чугуна оно растет от 6 до 14 Ом·м·10<sup>-7</sup>. У предварительно деформированного чугуна электросопротивление при одинаковых температурах испытания больше, чем у литого. Причем, чем выше степень деформации, тем больше значения электросопротивления. При температуре 1000°C электросопротивление чугуна, деформированного с  $\epsilon=80\%$ , достигает 19 Ом·м·10<sup>-7</sup>.

#### Выводы.

1. Установлена взаимосвязь степени горячей пластической деформации с электрическим сопротивлением деформированного чугуна.

2. Показано, что с увеличением степени деформации электросопротивление в продольном направлении возрастает. Таким образом, при данных параметрах деформационной обработки чугуна фактор наклепа металлической матрицы преобладает над фактором ориентации токопроводящей составляющей - графита.

3. Установлены численные значения электросопротивления при повышенных температурах. Показано, что у предварительно деформированного чугуна электросопротивление при одинаковых температурах испытания больше, чем у литого.

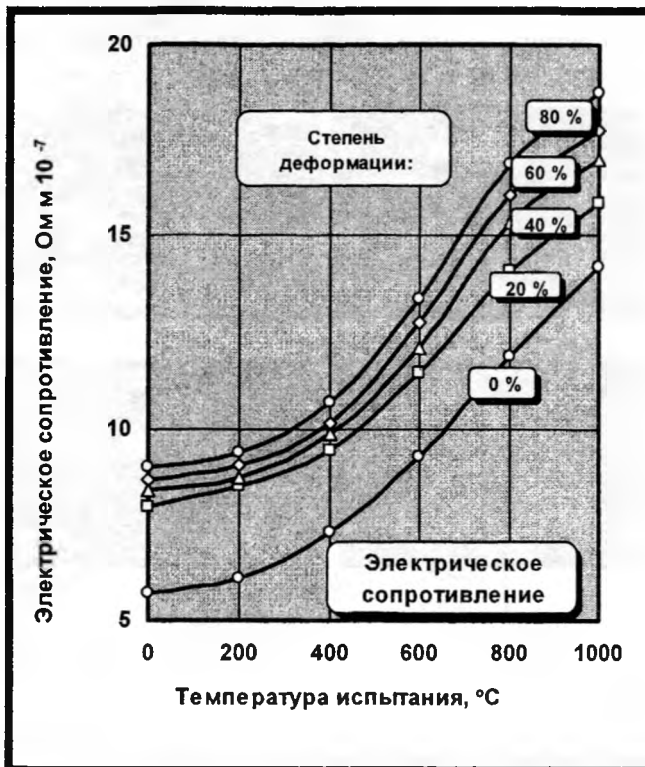


Рисунок. 6. Зависимость электрического сопротивления ВЧ 45 от температуры испытания. Продольные образцы