

volchuky@yandex.ru.

Дубров Юрій Ісайович, д. т. н., професор кафедри матеріалознавства та обробки матеріалів ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», e-mail: postmaster@pgasa.dp.ua.

УДК 621.7.0142:669.112

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ НА ПОВЕДЕНИЕ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ ЛЕДЕБУРИТНОГО КЛАССА В ПРОЦЕССЕ ГОРЯЧЕЙ ДЕФОРМАЦИИ

Т. М. Миронова,

Национальная металлургическая академия Украины,
кафедра материаловедения им. академика Ю. Н. Тарана-Жовнира

Ключевые слова: белые чугуны, эвтектика, пластичность, легирование, карбидное превращение, рекристаллизация, прокатка

К материалам повышенной износостойкости можно отнести карбидосодержащие железоуглеродистые сплавы эвтектического типа – легированные стали ледебуритного класса и белые чугуны. Обработка давлением является не только методом формоизменения изделий из этих сплавов, но и позволяет существенно улучшить их механические свойства. В результате деформации их прочность увеличивается в 2 – 4 раза, и становится сопоставимой с прочностью высококачественной стали, ударная вязкость вырастает в 3 – 6 раз, усталостная прочность в 2 – 2,5 раза. При этом сохраняются высокие показатели твердости и износостойкости.

Низкая технологическая пластичность как заэвтектоидных сталей, в структуре которых при введении карбидообразующих элементов появляются эвтектические карбиды, так и белых чугунов препятствует широкому применению их в деформированном состоянии.

При легировании белого чугуна карбидообразующими элементами такими, как: V, Cr, W, Mo происходит их растворение в карбиде железа M_3C при этом увеличивается его метастабильность. В процессе отжига в цементите эвтектических колоний происходит выделение более стабильных карбидных фаз, а из-за дефицита углерода цементит частично перекристаллизуется в аустенит.

Целью настоящей работы является изучение закономерностей формирования структуры в белых чугунах с различным содержанием углерода 2,3...3,5, а также дополнительно легированных ванадием. Хром не более 1,0% вводили для предотвращения образования графита. Для оценки деформационного поведения и горячей пластичности сплавов были выбраны испытания на горячее кручение и свободнаяковка.

В структура исследуемых сплавов состоит из дендритов аустенита (точнее продуктов его распада) и аустенитно-цементитной эвтектики, расположенной в междендритных участках. Эвтектическая составляющая, образованная на базе карбида Fe_3C , имеет преимущественно сотовое строение, однако встречаются и колонии пластинчатого ледебурита. В сплаве, содержащем 2,3 %C, эвтектика частично закристаллизовалась в виде тонкого конгломерата фаз, несмотря на невысокие скорости охлаждения (около 100 град/мин). Это можно объяснить низкой степенью эвтектичности сплава, а также наличием примесей, присутствующих в шихтовых материалах. С увеличением содержания углерода доля сотового ледебурита, как и общее количество эвтектики, увеличивается.

Кривые зависимости пластичности от температуры имеют куполообразную форму (рис. 1). Максимальный уровень пластичности наблюдается в интервале температур 1050 – 1080°C. С увеличением содержания углерода, а следовательно и степени эвтектичности, пластичность понижается. В процессе деформации зерна аустенита вытягиваются по направлению действия растягивающих напряжений. В пластинчатом ледебурите происходит постепенное утонение и разрыв перемычек, соединяющих цементитные пластины (рис. 2, а). Теряя контакт между собой, пластины смещаются друг относительно друга, становясь более изолированными в аустенитной матрице. В сотовом ледебурите цементит разделяется на пластины таким образом, что колония приобретает строение, напоминающее пластинчатый ледебурит (рис. 2, б). При более высоких температурах испытания 1000 – 1080°C параллельно актам пластической деформации в цементите успевает пройти динамическая рекристаллизация, в результате чего

наблюдается деление кристаллов цементита по границам образовавшихся фрагментов и даже их сфероидизация (рис. 3).

Для изучения влияния легирования ванадием, на уровень пластичности и оптимальный температурный интервал горячей деформации использовали сплав с содержанием углерода 3,02 % и ванадия 3,01 %. Испытания проводили в интервале температур 950 – 1120°С на образцах, подвергнутых различным температурным обработкам (рис. 4).

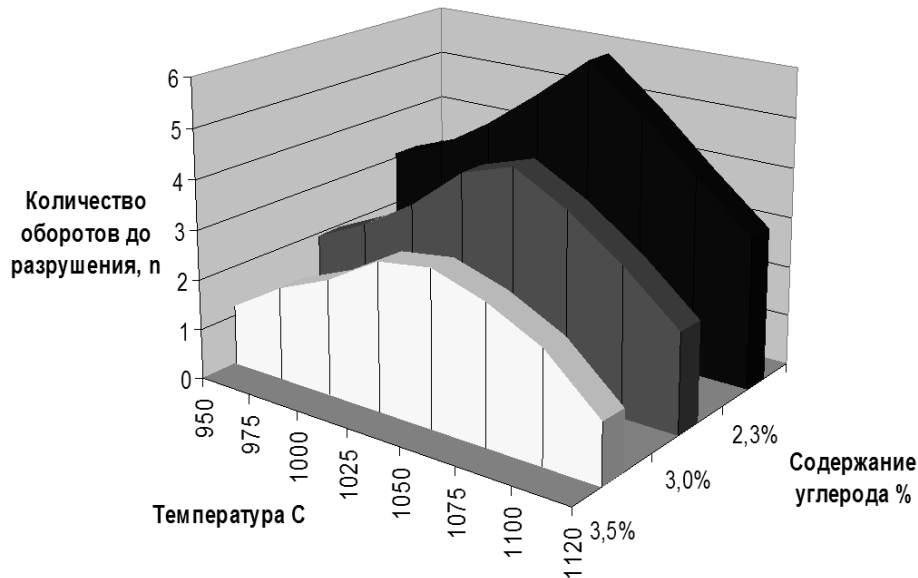
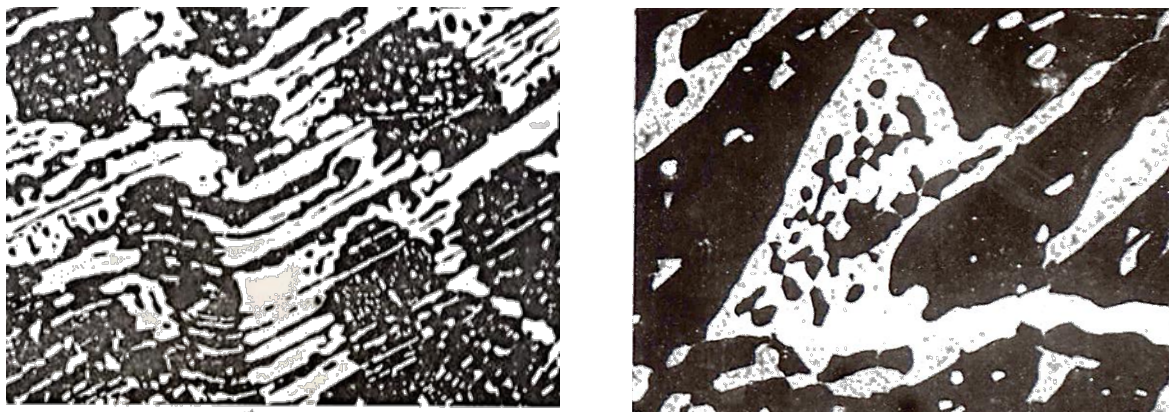


Рис. 1. Зависимость пластичности (n) от температуры и содержания углерода в сплаве (результаты испытания белых чугунов на горячее кручение)

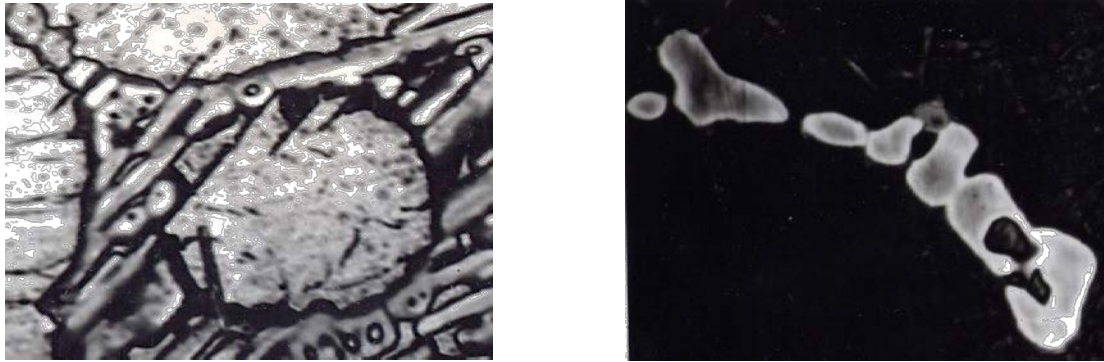


а

б

Рис. 2. Формоизменения в колониях ледебурита в процессе деформации. Тепловое травление, 850×

По сравнению с нелегированными чугунами пластичность существенно повышается. Это объясняется тем, что в легированном ванадием цементите еще в процессе предварительной обработки наблюдается фазовое превращение: в пересыщенном ванадием цементите выделяются карбиды ванадия, за счет чего часть цементита обезуглероживается и превращается в аустенит, при этом содержание ванадия в карбиде железа снижается. Схематично это превращение можно записать следующим образом: $(\text{Fe}, \text{V})_3\text{C} \rightarrow \text{VC} + \text{аустенит} + \text{Fe}_3\text{C}$ (рис. 5).



а

б

Рис. 3. Фрагментация эвтектического цементита(а) и деление по образовавшимся межзеренным границам(б), 1200×

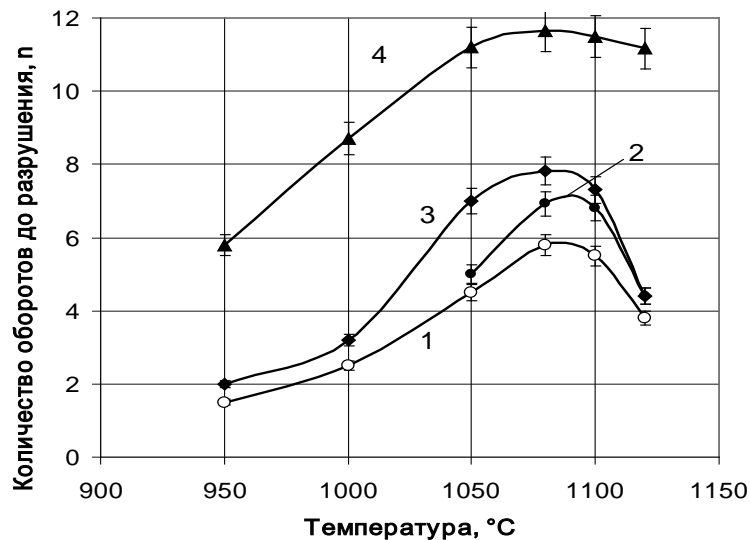


Рис. 4. Влияние предварительной деформации на зависимость числа оборотов до разрушения (n) от температуры испытания чугуна с 3,02 % С и 3,01 % V: 1 – 1000 °С 3 час, 680 °С 4 час; 2 – отжиг по режиму (1), прерывание деформирования при $\varphi = 540^\circ$ одночасовой выдержкой при температуре испытания; 3 – отжиг по режиму I, прерывание кручения при $T = 950$ и $\varphi = 540^\circ$ одночасовой выдержкой, а затем нагрев до температуры испытания и деформация до разрушения; 4 – предварительная прокатка ($\varepsilon = 65\%$) + отжиг по режиму I

Причем, уникальность этого превращения состоит не в том, что оно наблюдается в процессе тепловой обработки перед деформированием и способствует нарушению монолитности цементита в колониях ледебурита за счет образования межфазных границ VC/Fe₃C. Феномен данного фазового перехода в ванадиевых чугунах состоит в следующем. С одной стороны объемный эффект от возникновения карбидов VC в цементите способствует генерированию дислокаций и облегчает их передвижение в процессе пластической деформации за счет повышения концентрации неравновесных вакансий, а с другой стороны, на дефектах, в том числе дислокациях и полосах скольжения облегчается зарождение новых кристаллов карбидов VC (рис. 5, б). Деформация является своеобразным стимулятором фазовых превращений. Эффект пластифицирования цементита непосредственно в процессе деформирования был назван дактилированием [1]. За счет этого эффекта пластичность чугуна повышается 2 – 2,5 раза.

Для проведения детального изучения влияния предварительной деформации на структуру и пластичность ледебуритного, легированного ванадием чугуна, были проделаны следующие испытания на горячее кручение: предварительно отожженные по режиму 1000°C 3 часа и 680°C 4 часа образцы нагревали до заданной температуры, закручивали на угол 540°, далее прекращали деформацию и выдерживали 1 час при данной температуре (без охлаждения), затем возобновляли деформацию до разрушения; отожженные также образцы при 950°C закручивали на $\varphi = 540^\circ$, час выдерживали при этой же температуре, нагревали до температуры испытания и скручивали до разрушения (рис. 4). Кроме того, испытывали также образцы, вырезанные из ранее прокатанных заготовок.

Предварительная деформация существенно повышает пластичность дактилированного чугуна. Интересен тот факт, что при небольших степенях деформации температурный фактор даже в небольшом диапазоне (950...1120°C) имеет важное значение с точки зрения повышения пластичности. При разнице в 100° пластичность при 1050°C почти в 3 раза увеличивается по сравнению с кручением при 950°C (рис. 6, кривая 2). Это объясняется совпадением температур развития карбидного превращения и рекристаллизационных процессов в цементите. Трудно сказать, успевает ли при 1 часовой выдержке проходить статическая рекристаллизация или при повторном наложении деформации развивается динамическая, но микроструктурно в образцах, испытанных при температуре 1050°C и выше, в цементите формируется сеть высокоугловых границ (рис. 6, а).

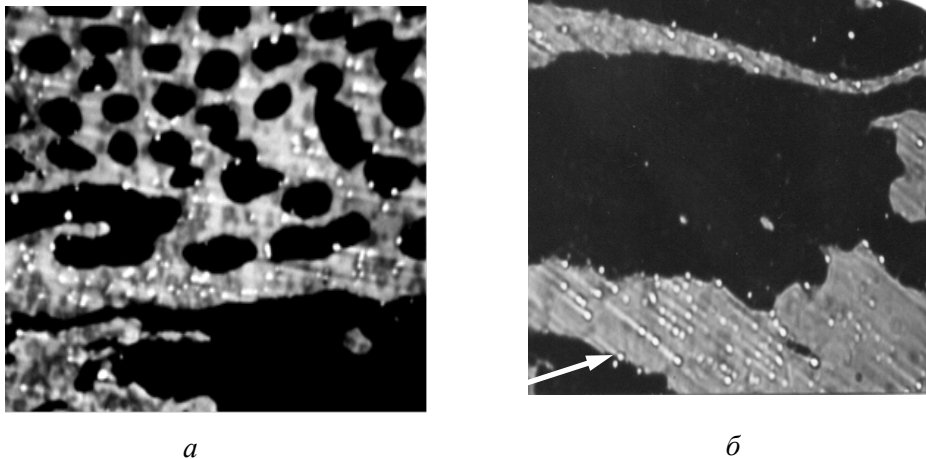


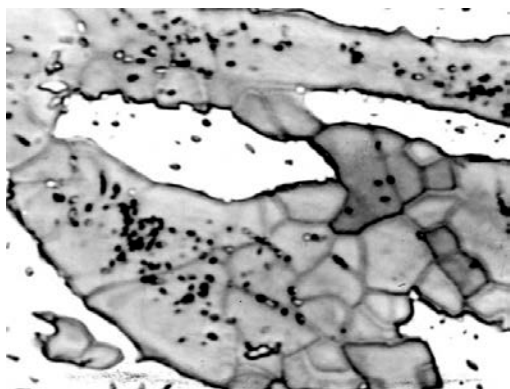
Рис. 5. Образование карбидов MC в легированном ванадием эвтектическом цементите: а – в процессе отжига; б – в процессе горячей прокатки, $\times 1200$

Скорее всего, в этом случае начавшиеся при высокотемпературной выдержке после предварительного скручивания процессы разупрочнения переходят в динамическую рекристаллизацию после возобновления деформации. При 950 °C тонкая структура цементита не имеет такой развитой субзеренной структуры, то есть ни статическая, ни динамическая рекристаллизация не протекают (рис. 6, б).

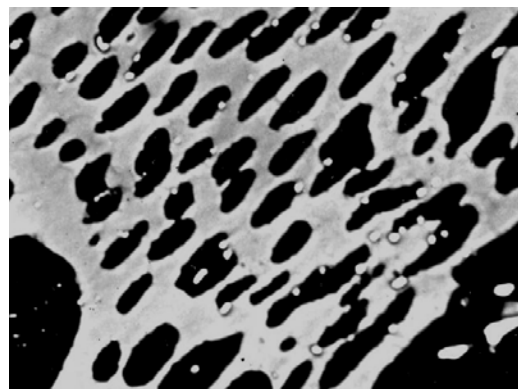
При кручении предварительно продеформированных и выдержанных при 950°C образцов, а затем испытанных при более высоких температурах 1050...1120°C (рис.6, кривая 3) наблюдается формирование границ зерен в некоторых кристаллах цементита (рис. 6, в). Не исключено, что они образовались в процессе дополнительного нагрева при достижении более высокой температуры испытаний. Общепринятые представления о механизмах рекристаллизации сводятся к тому, что образование зародышей новых зерен связано с перегруппировкой дислокаций, приводящей к предрекристаллизационной полигонизации. Такая полигонизация могла происходить в данном случае в процессе выдержки при более низких температурах после предварительного скручивания образцов на 540°. Пластичность в этом случае более высока, но ниже, чем у образцов, подвергнутых предварительной деформации при высоких температурах испытания. То есть при 1050°C и выше, независимо от температуры предварительной и окончательной деформации, в цементите развиваются рекристаллизационные процессы. Давно замечено [2], что для того, чтобы вызвать рекристаллизацию, необходима не сама по себе высокая степень предварительной деформации, а обязательно деформация множественным скольжением.

При повторной деформации, которая протекала при температурах ниже 950°C, характерным является выделение карбидов в полосах скольжения (рис. 5.), проявляющееся в строчечном расположении дисперсных VC. Невозможно утверждать однозначно в каких плоскостях это происходит. Возможно как раз в системе скольжения {111}. В образцах продеформированных при более высоких температурах такая «строчечность» для выделения VC в цементите не характерна. Преимущественное расположение этих частиц наблюдается на образующихся при рекристаллизации границах. Благотворное влияние на пластичность взаимодействия процессов распада цементита и динамической рекристаллизации явно прослеживается. При повторной деформации в интервале температур, где эти процессы протекают, наблюдается повышение пластичности в 1,5 раза (рис. 4).

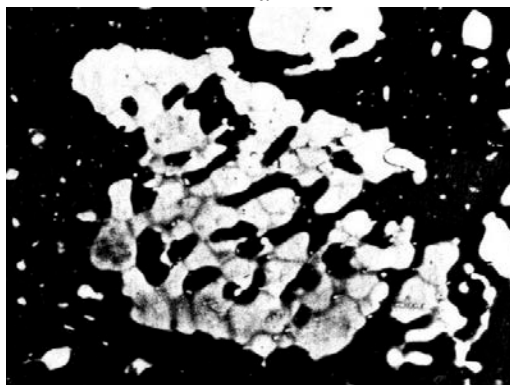
Согласно классическим представлениям о роли примесей в твердых растворах и фазах внедрения в развитии статического и динамического разупрочнения [2] дополнительное легирование цементита хромом и ванадием тормозит рекристаллизационные процессы при деформации. Однако когда при увеличении концентрации ванадия в пересыщенном цементите развивается карбидное превращение, то меняется его поведение при деформировании. Как уже отмечалось, это превращение происходит с объемным эффектом, и образующиеся вакансии облегчают диффузионное перемещение дислокаций, сдвигая интервал максимальной пластичности в область более высоких температур по сравнению с нелегированными чугунами. При повторной деформации карбидное превращение не прекращается и воздействует на поведение цементита по описанному механизму, помимо этого в цементите увеличено количество уже выделившихся частиц VC, которые в свою очередь оказывают влияние на формирование дислокационной структуры. Это влияние может сводиться к возникновению новых источников генерирования дислокаций. Причем, учитывая, что карбидное превращение стимулировало новую систему скольжения [3], не исключено, что эти дислокации одноименные. Избыток дислокаций одного знака, как известно, является одной из основных причин развития рекристаллизации. Не следует забывать, что помимо сказанного, при повторной деформации концентрация ванадия в карбиде железа уменьшается (т.к. до этого интенсивно выделялись карбиды VC). Этот факт можно отнести также в пользу развития рекристаллизации. Поэтому при повторной деформации становится возможной динамическая рекристаллизация.



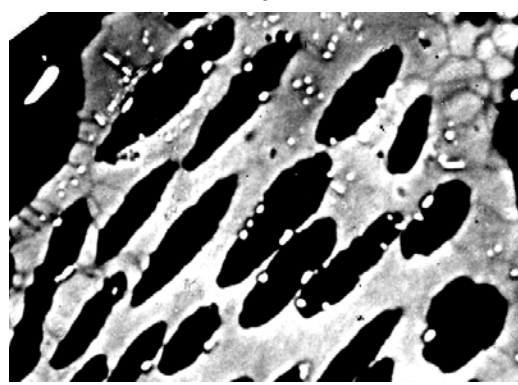
а



б



в



г

Рис. 6. Формирование структуры в ледебуритных ванадиевых чугунах при испытаниях на горячее кручение с прерыванием испытания, $\times 12000 \times 2$: а – при 1050°C; б – при 950°C; в – при 950°C и повторно испытанных при 1050°C; г – повторно испытанных при 1000°C

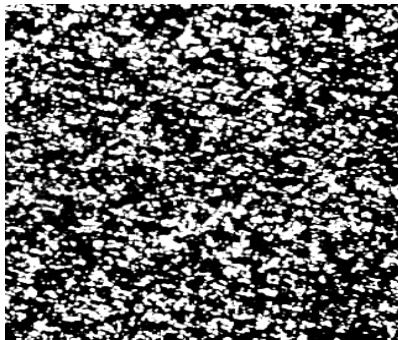
Как уже отмечалось, обработка давлением благотворно влияет на весь комплекс механических свойств белых чугунов (таблица) за счет перераспределения эвтектических карбидов в металлической матрице (рис. 7).

Таблица

Механические свойства промышленного чугуна (табл. 6.9).

Состояние чугуна перед испытаниями	Вид обработки	Твердость HRc	$\sigma_{в}$, МПа	$\sigma_{т}$, МПа	δ , %	ψ , %	КСУ, кДж/м ²
После затвердевания	Отжиг	30 – 32	370	-	0	0	30
Деформированное прутки Ø90	Отжиг	24 – 27	590	480	6,6	4,5	670
Деформированное прутки Ø40	Отжиг	23 – 25	700	545	7,0	5,5	850

Использование карбидных превращений позволило успешно осуществить деформацию ледебуритных чугунов на кузнечно-прессовом оборудовании в промышленных условиях предприятия «Днепротяжмаш» (г. Днепропетровск) и «Днепроспецсталь» (г. Запорожье). Слитки массой 25 кг и 30 кг ковали на молоте (с массой падающих частей 1 т) на заготовки следующих размеров: Ø25 мм, Ø45 мм, Ø30 мм и полосу 30 × 100 мм. Ковку выполняли в интервале 1050...850 °С с несколькими промежуточными подогревами (0,5 ч). Из 200 кг слитков были получены поковки квадратного сечения 100 × 100, а также круг Ø 90 и Ø 50.



а



б

Рис. 7. Микроструктура прокатанных образцов, $\times 100$: а – в поперечном сечении; б – в продольном сечении

Из полученного сортового проката изготовлены валки для холодной прокатки. Применение разработанных режимов окончательной термической обработки, в том числе при использовании скоростного поверхностного нагрева токами высокой частоты, позволило достигнуть повышения их эксплуатационной стойкости в 2...4 раза по сравнению с традиционно используемыми из сталей 9ХШ, 9Х, 9ХС.

Феномен данного фазового перехода в ванадиевых чугунах состоит в следующем. С одной стороны объемный эффект от возникновения карбидов VC в цементите способствует генерированию дислокаций и облегчает их передвижение в процессе пластической деформации за счет повышения концентрации неравновесных вакансий, а с другой стороны, на дефектах, в том числе дислокациях и полосах скольжения облегчается зарождение новых кристаллов карбидов VC (рис. 5, б). Деформация является своеобразным стимулятором фазовых превращений

Выводы. 1. Определяющим структурным параметром в поведении ледебуритных сплавов является количество эвтектической составляющей, ее расположение в виде сплошной или прерывистой сетки, а также строение эвтектических колоний.

2. При горячей деформации обнаружена фрагментация в кристаллах эвтектического цементита за счет развития динамической рекристаллизации.

3. Существенную роль в повышении пластичности белых чугунов играют процессы влияющие на формирование субзеренной структуры в эвтектическом цементите.

4. Горячая деформация стимулирует выделение карбидов VC в пересыщенном ванадием карбиде железа. Данное карбидное превращение способствует развитию рекристаллизации в эвтектическом цементите в время промежуточного отжига.

5. В процессе деформации происходит деление цементитных кристаллов по образовавшимся новым границам, что способствует повышению пластичности чугуна при последующей деформации.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. **Миронова Т. М.** Структура и свойства деформируемых чугунов / Т. М. Миронова, В. З. Куцова. – Д. : Дриант, 2009. – 190 с.

2. **Горелик С. С.** Рекристаллизация металлов и сплавов / С. С. Горелик. – М. : Metallurgiya, 1978. – 568 с.

3. **Миронова Т. М.** Управление формированием структуры в белых ледебуритных чугунах на различных этапах деформационного передела / Т. М. Миронова, М. М. Рябчий // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2008. – № 4. – С. 79 – 81.

SUMMARY

Treatment of pressure can significantly improve the mechanical properties of the iron-alloy eutectic, such alloys are white cast irons. If you increase the technological plasticity, you can use these alloys deformed state.

The primary structure of white cast iron consists of austenite dendrites and eutectic, this is virtually unchanged from heat treatment and it saved when heated under hot deformation. When the alloying white white cast iron of V, Cr, W, Mo, this elements dissolve in the iron carbide M₃C, and carbide's metastability increases. more stable carbide phase are highlighted in the cementite eutectic colonies when to apply annealing, then in the cementite is not enough carbon and it transforms into the austenite. The result is a division of cementite. We must use the phase transformations in the eutectic carbides to improve their plasticity.

The purpose of the work is to study the effect of structural features on conduct of iron-carbon alloys of ledeburite class with different carbon content 2,3...3,5 %, and with vanadium. in the process of hot deformation.

It has been found, when the deformation of the main structural parameter ledeburitic alloys is the amount of eutectic constituent in the form of a continuous or discontinuous grid, as well as the structure of eutectic colonies. The formation of a subgrain structure in the eutectic cementite increases ductility white cast irons. Hot deformation stimulates the formation of carbides VC in the iron carbide, which is supersaturated vanadium. This carbide turning contributes to the development of recrystallization in the eutectic cementite during intermediate annealing. In the deformation process is a division cementite crystals on new boundaries, it increases ductility of cast iron during deformation. The use of carbide transformations allowed us to successfully carry out the deformation ledeburitic irons on the equipment in an industrial environment.

REFERENCES

1. Mironova T. M. Struktura i svojstva deformiruemyyh chugunov / T. M. Mironova, V. Z. Kucova. – D. : Driant, 2009. – 190 s.

2. Gorelik S. S. Rekristallizacija metallov i splavov / S. S. Gorelik. – M. : Metallurgija, 1978. – 568 s.

3. Mironova T. M. Upravlenie formirovaniem struktury v belyh ledeburitnyh chugunah na razlichnyh jetapah deformacionnogo peredela / T. M. Mironova, M. M. Rjabchij // *Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost'*. – 2008. – № 4. – S. 79 – 81.

Відомості про автора:

Миронова Тетяна Михайлівна, д. т. н., проф. кафедри матеріалознавства ім. академіка Ю. М. Тарана-Жовнира Національної металургійної академії України, e-mail: t.mironova@mail.ru.