

**Список литературы**

1. Потапкин В.Ф. Методика проектирования технологического процесса горячей прокатки полос. — Краматорск КИИ, 1977.
2. Потапкин В.Ф., Журавлев А.С., Бобух И.В. Металлургия и коксохимия: Республиканский межведомственный научно-технический сборник. — Киев. Техніка, 1971. — вып. 27. — С. 113–117.
3. Целиков А.И. Теория расчета усилий в прокатных станах. — М.: Metallurgizdat, 1962. — С. 494.
4. Зюзин В.И., Бровман М.Я., Мельников А.Ф. Сопротивление деформации сталей при горячей прокатке. — М.: Metallургия, 1964.
5. Бровман М.Я. Применение теории пластичности в прокатке. — М.: Metallургия, 1965.
6. Бровман М.Я., Зеличенко Б.Ю., Герцев А.И. Усовершенствование технологии прокатки толстых листов. — М.: Metallургия, 1969. — 256 с.
7. Луговской В.М. Алгоритмы систем автоматизации листовых станов. — М.: Metallургия, 1974. — 320 с.
8. Карнаушенко Н.А., Капустина М.И. Методика расчета режимов прокатки на слябингах. — Мариуполь.: ПГТУ, 1999.
9. Андреюк А.В., Тюленев Г.Г. / Сталь, 1972. — №9. — С. 825–828.
10. Снижение энергозатрат при прокатке полос / А.Л.Остапенко, Ю.В.Коновалов, А.Е.Руднев, В.В.Кисиль. — К.: Техніка, 1983. — 223 с.

© Остапенко А.Л., Сидоров Д.И., Коновалов Ю.В., Кузьмин А.В., 2004

БАРАНОВ Д.А., ЛЕЙРИХ И.В. (ДОННТУ), КУХТА А.В. (ОАО «ДМЗ», Г. ДОНЕЦК)

**КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ГРАФИТА ПРИ ПРОКАТКЕ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА**

*Получена математическая зависимость величины формоизменения графита при прокатке высокопрочного чугуна. Она основана на экспериментальных данных, которые получены для чугуна, содержавшего 2,88%С, 2,84%Si, 0,78%Mn, 0,015%S, 0,08%P, 0,08%Cr и 0,048%Mg и прокатанного при 20°C, 600°C и 1000°C с обжатием 0–75%. Эта зависимость может быть использована при выборе технологических параметров деформации высокопрочного чугуна.*

При прокатке и ковке многофазных сплавов испытывают деформацию основа сплавов и включения избыточных фаз. Для характеристики изменения структуры и свойств сплавов следует знать характер формоизменения включений избыточных фаз. В работах [1, 2] рассмотрена математическая модель развития напряжений и деформаций вокруг включений избыточных фаз в однородной металлической матрице при обработке давлением многофазных сплавов. Показано, что обжатие сплава на половину высоты при определенном отношении реологических свойств включения и основы деформирует твердые частицы на 0,1, в то время как мягкие частицы деформируются почти на 2/3 высоты. По мере деформирования сплава реологические свойства фаз меняются, что проявляется на относительном формоизменении кристаллов. В работе [3] определено изменение формы неметаллических включений при горячей прокатке стали. В зависимости от пластичности основными формами включений являлись: 1) равноосная форма; 2) слегка вытянутый эллипсоид; 3) оладьеобразная форма; 4) тонкие раскатанные включения. В результате математической обработки экспериментальных данных в работе [3] установлена аналитическая зависимость размеров неметаллических включений от степени деформации стали.

Физико-механические свойства серых чугунов зависят от формы графита [4]. Форма графита в высокопрочном чугуне во время деформирования меняется от шаровидной к эллипсоидальной и, наконец, к дискообразной [5, 6]. В связи с тем, что в технологию чугуна с шаровидным графитом в последние годы широко включают пласти-

ческую деформацию [7, 8], появляется настоятельная необходимость в знании влияния температуры и степени деформации чугуна на формоизменение шаровидного графита. Располагая этой информацией, технолог может выбрать основные температурно-деформационные параметры и предсказать результат формоизменения графита, а значит, и определить характер изменения свойств.

При поиске количественной зависимости формоизменения графита нами была учтена информация, полученная в работах [5, 6] при экспериментальном исследовании деформации графита во время холодной, теплой и горячей прокатки высокопрочного чугуна в широком интервале обжатий. Дополнительная информация получена в экспериментах, приведенных ниже

Исходная структура чугуна, содержащего 2,88%С, 2,84%Si, 0,78%Mn, 0,015%S, 0,08 %P, 0,08%Cr и 0,048%Mg, характеризовалась ферритной матрицей и шаровидными (100%) включениями графита. Распределение графитных включений в плоскости шлифа определяли при увеличениях 50..200. Все графитные частицы распределялись в трех группах по их диаметру  $d_i$ : 1) 30...20, 2) 20...10 и 3) меньше 10 мкм. Число частиц в объеме чугуна определяли из соотношения:  $N_v = N_s \cdot d^3$ , где  $N_s$  — число частиц на поверхности шлифа. В результате прокатки, методика которой описана в работе [5], шаровидные в сходном состоянии графитные частицы (рис. 1, а) приобретали после обжатия 75% дискообразный вид (рис. 1, б).

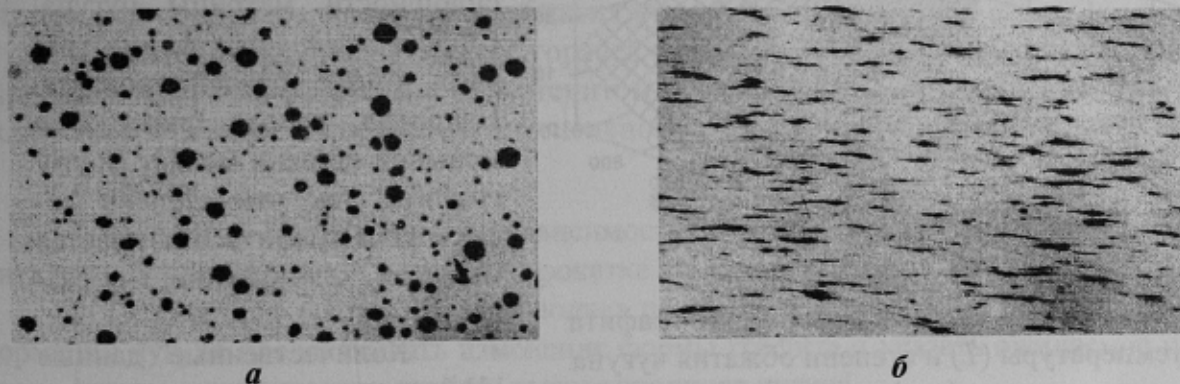


Рис. 1. Структура чугуна до (а) и после (б) холодной прокатки с обжатием 75%, x100

Количественную оценку деформации графита при прокатке чугуна производили по изменению высоты ( $h$ ) вытянутых включений, а степень деформации ( $\epsilon_r$ ) оценивали по формуле:

$$\epsilon_r = \frac{d-h}{d}. \quad (1)$$

Непосредственный замер высоты включений на шлифах затруднен из-за искажений, вносимых изготовлением шлифа. Графит — мягкая фаза и при механической обработке чугуна легко деформируется и разрушается, что вносит трудности при определении истинной высоты включений. Ошибка в определении на шлифах высоты включений графита с утонением частиц возрастает и превышает 100% для включений с высотой  $h < 0,5$  мкм. В связи с этим при определении степени деформации графита пользовались данными о величине малой оси ( $h$ ) эллипсоидов, вычисленной по данным об изменении больших осей эллипсоидов ( $a$  и  $b$ ). Имея в виду постоянство объема, в соответствии с работой [5] запишем:

$$\epsilon_r = 1 - \left(\frac{d}{b}\right)^2. \quad (2)$$

При исследовании формы деформированных включений графита обратили внимание на то, что мелкие частицы деформированы меньше крупных [6]. Поэтому количественную оценку формоизменения производили по включениям I и II размерных групп, в которых, в основном, и заключен свободный углерод чугуна. Тонкие и короткие сечения графитных частиц, по присутствию которых иногда судят об интенсивной деформации мелкого графита, на самом деле являются краевыми сечениями графитных дисков [6].

Приведенные в работе [5] количественные данные об изменении формы графита при холодной (20°C), теплой (600°C) и горячей (1000°C) прокатке позволяют заключить, что наиболее сильно деформируются частицы при холодной прокатке. Снижение прочности графита из-за образования трещин [8], упрочнение металлической основы благодаря накоплению дислокаций, являются причиной повышающегося с деформацией чу-

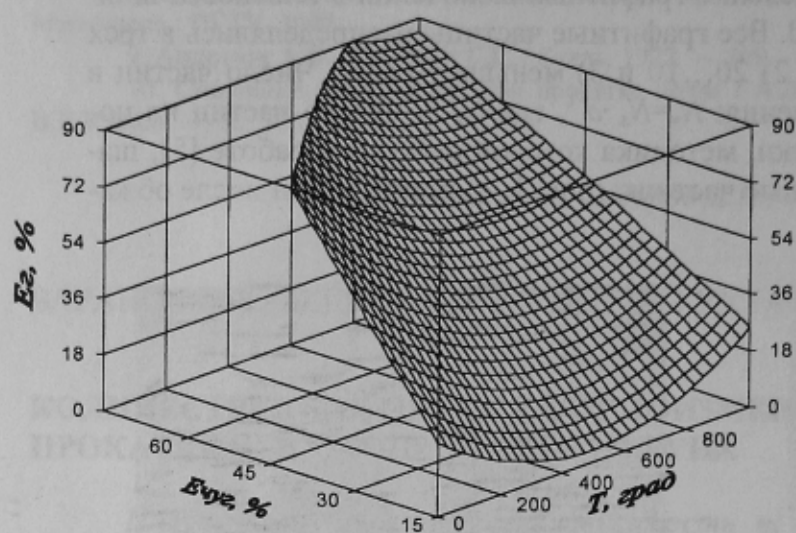


Рис. 2. Зависимость степени деформации графита ( $\epsilon_g$ ) от температуры ( $T$ ) и степени обжатия чугуна ( $\epsilon_{чуг}$ )

гуна различия в свойствах графита и матрицы. Это различие влечет за собой интенсивное формоизменение графита. При холодной деформации легко образуются «хвосты» и «усы», с которыми связаны нарушения сплошности матрицы чугуна. Сильно изменяется форма графита и при горячей прокатке. Напротив, теплая прокатка в меньшей степени меняет форму графита, так что степень деформации графита оказывается меньшей, чем чугунового образца.

Количественные данные [5] использованы для построения графической зависимости, представленной на рис. 2.

Форма поверхности с достаточной точностью описывается аналитической зависимостью, которая для изученного нами чугуна имеет вид:

$$\epsilon_g = -14,35 - 0,059 \cdot t + 8,18 \cdot 10^{-3} \cdot t^2 - 0,0014 \cdot t \cdot \epsilon_{чуг} + 2,56 \cdot \epsilon_{чуг} - 0,0014 \cdot \epsilon_{чуг}^2 \pm 8,1, \quad (3)$$

где  $t$  — температура прокатки в интервале 20–1000°C,  $\epsilon_{чуг}$  — степень обжатия чугуна, %.

Коэффициент детерминации для указанной зависимости составил более 94%. Следовательно, уравнение (3) с высокой достоверностью описывает экспериментальные результаты.

При обсуждении результатов математической обработки экспериментальных данных нужно учитывать, что металлическая основа чугуна и включения графита по-разному изменяют свои реологические характеристики с температурой деформации. Об этом ориентировочно можно судить на основании данных о прочности графита и чугуна. На рис. 3 приведены количественные данные о температурной зависимости предела прочности при растяжении чугуна с шаровидным графитом, заимствованные из работы [9], и прочности графитных волокон при кручении, полученной в работе [10].

Видно, что при 600°C кривые пересекаются. Это означает, что ниже 600°C графит менее прочен, чем металлическая основа и должен менять свою форму в большей мере, чем чугун. Поэтому холодная прокатка высокопрочного чугуна вызывает интенсивное формоизменение графита. Горячая прокатка при 1000°C происходит в условиях,

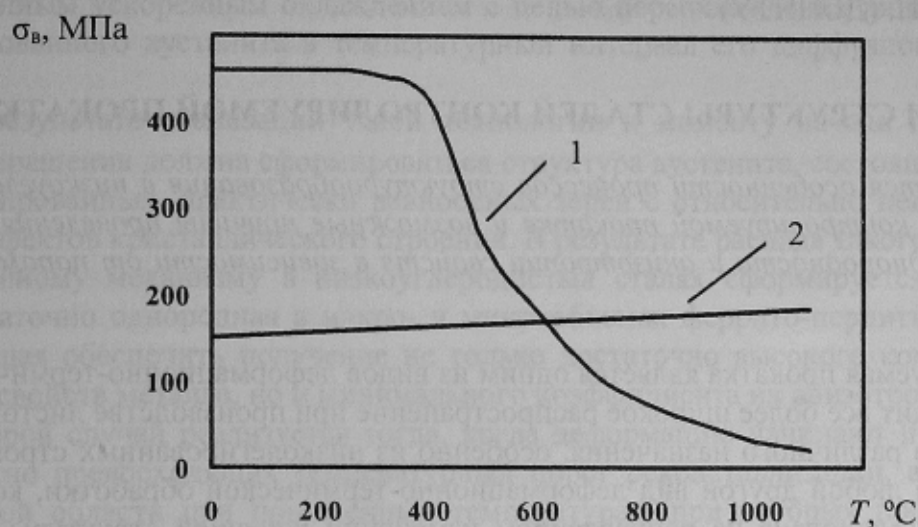


Рис. 3. Влияние температуры на прочность чугуна с шаровидным графитом (кривая 1) и графитовых волокон (кривая 2)

когда сопротивление деформации графита выше, чем чугуна. Вместе с тем при горячей прокатке также наблюдается интенсивное формоизменение графита, численные значения которой совпадают со степенью обжатия чугуна.

По всей видимости, в процессе горячей прокатки высокопрочного чугуна благодаря взаимодействию графита с аустенитом имеет место разупрочнение участков включений, что является причиной интенсивного деформирования графита.

#### Выводы

1. Получена математическая зависимость, описывающая формоизменение графита при холодной, теплой и горячей прокатке высокопрочного чугуна.
2. Полученная зависимость позволяет по данным о степени и температуры деформации чугуна предсказывать изменение формы графита и указать ожидаемое изменение физико-механических свойств высокопрочного чугуна.

#### Список литературы

1. Pietrzyk H., Kuziak J., Kuziak G., Grosman F. Fields of strains around the inclusion of second phase in a uniform matrix undergoing plastic deformation // *Steel Research*, 1991. — № 11. — P. 507–511.
2. Миленин А.А. Теоретический анализ напряженно-деформированного состояния в области включения второй фазы при обработке давлением двухфазных материалов // *Металлы*, 1995. — № 2. — С. 108–114.
3. Бельченко Г.И., Губенко С.И. Неметаллические включения и качество стали. — К.: Техника, 1980. — 168 с.
4. Беляков А.И., Беляков А.А. Зависимость физико-механических свойств чугунов от коэффициента формы графита // *Литейное производство*, 1998. — № 11. — С. 28–29.
5. Деформация графита при прокатке высокопрочного чугуна / Д.А. Баранов, С.М. Кутя // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении: Тематич. сб. науч. тр. — ДГМА, Краматорск, 2002. — С. 353–355.
6. Баранов Д.А., Неснов Д.В. Компьютерное моделирование формоизменения графита при деформировании высокопрочного чугуна // *Металознавство та обробка металів*, 2002. — № 4. — С. 11–16.
7. Горячая пластическая деформация высокопрочного чугуна / Н. П. Лякишев, Г. В. Щербединский // 5-ое собрание металлургов России. — Краснодар, 10–13 сент. 2001: Сборник трудов. — Краснодар, 2001. — С. 249–251.
8. Баранов А.А., Баранов Д.А. Перспективы технологий, основанных на совмещении горячей деформации и термической обработки чугуна // *Изв. ВУЗов. Черная металлургия*, 2002. — № 7. — С. 34–40.
9. Антонишин Ю.Т. Пластическая деформация чугуна. — Мн.: Навука і тэхніка, 1991. — 119 с.
10. Дифендорф Р.И. Механическая прочность пиролитического графита // В сб. *Графит как высокотемпературный материал*. — М.: Мир, 1964. — С. 89–98.