

лого свода и срок службы медных держателей электродов, уменьшить технологические простои за счет добавления части электродов на фазу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лопухов, Г.А. Состояние и тенденции развития электросталеплавильного производства / Г.А. Лопухов // Электromеталлургия. 2000. № 7. С. 35 – 37.
2. Лопухов, Г.А. Эффективные технологии электросталеплавильного производства / Г.А. Лопухов // Новости черной металлургии за рубежом. 1997. № 3. С. 38 – 54.
3. Патент РБ № 1500. Устройство для охлаждения графитированных электродов / В. Н. Прохоренко, В. А. Яцко. № U 20040005; заявл. 08.01.04; опубл. 15.04.2004 // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. 2004. № 2.

УДК 621.74

А.Б. СТЕБЛОВ, д-р техн. наук,
Д.В. ЛЕНАРТОВИЧ (БНТУ)

СТАЛИ ДЛЯ ШТАМПОВ ГОРЯЧЕГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Рентабельность машиностроительных предприятий во многом зависит от стойкости деформирующего инструмента. В настоящее время для штампов горячего деформирования используются стали с химическим составом, соответствующим ГОСТ 5950–73 «Сталь инструментальная легированная», к которым предъявляются требования по обеспечению следующих физико-механических свойств: высокие твердость, износостойкость, теплостойкость, сопротивление смятию, вязкость, прочность, пластичность при нормальных и повышенных температурах.

Стали для штампов горячего деформирования используются в штамповочных молотах, прессах, горизонтально-ковочных машинах и т.д. Скорость деформирования металла в высокоскоростных молотах и гидравлических прессах достигает 30 м/с. Основные особенности работы инструментов для горячего деформирования – высокий разогрев штампов в процессе работы, одновременное воздействие циклически изменяющихся температур и давлений, большие удельные давления на инструмент.

Базовой для штампов горячего деформирования является сталь 5ХНМ. Она используется для штампов скоростной штамповки, вставок для ковочных машин, крупногабаритной оснастки ударного действия, молотовых штампов. Для крупногабаритной горячедеформирующей оснастки ударного действия применяются азоти-

руемые стали 5ХНВ, 5ХГМ, 5ХНВС, 7ХЗ, для горячего прессования в штампах ударного действия – азотируемые стали 5Х2МНФ, 4ХНМФС, для пресс-форм и тяжело нагруженных пресс-форм – 4Х5МФС, 4Х4ВМФС.

В СНГ штамповые инструментальные стали производятся на волгоградском металлургическом заводе «Красный Октябрь», Златоустовском металлургическом заводе, металлургическом заводе «Сибэлектросталь», московском металлургическом заводе «Серп и Молот», нижегородском арендном предприятии «Сталь», Омутнинском металлургическом заводе, Оскольском металлургическом заводе, на «Электростали», «Днепроспецстали», Белорусском металлургическом заводе.

Стали 5ХНМ относятся к флокеночувствительным сталям мартенситного класса. После прокатки они обязательно подвергаются изотермической обработке выше точки A_{c3} , а затем термической обработке в изделиях.

Несмотря на использование в течение нескольких десятилетий главным образом стали 5ХНМ, поиск оптимального химического состава стали для штампов горячего деформирования не прекращается. В данной работе выполнен анализ химического состава всех известных в мире штамповых марок сталей 5ХНМ. В качестве базы данных использованы компьютерная программа WinSteel и немецкий классификатор марок сталей Stahlchlüssel. Первоначально было выбрано 389 марок сталей с содержанием каждого химического элемента не более 5%. Бесспорным лидером в производстве таких сталей является Россия, выпускающая более 80 марок сталей для штампов горячего деформирования. В США используются стали 32 марок (AISI), в Японии (JIS) – 28, в Германии (DIN) – 22, во Франции (AFNOR) – 14, в Болгарии – 12 марок. Некоторые страны с развитой металлургией имеют малое количество штамповых марок сталей (например, Австрия – только 3 марки).

Анализ химического состава сталей показывает, что в основном по химическим элементам стали этого класса укладываются в известные по ГОСТ 5950–73 марки стали 5ХНМ, 5ХНВ, 5ХН2МНФ. Однако в каждой стране есть своя специфика, например Россия, Италия, Венгрия, Румыния достаточно широко используют молибден и вольфрам, Польша, США – вольфрам и кобальт. Во всех странах мало используется бор, ниобий, цирконий, барий, РЗМ.

Кроме того, был выполнен поиск марок сталей по патентам глупиной поиска 30 лет по классам C22 C38/xx и C21D8/xx, а также соответствующих названиям «Сталь штамповая» или DIE STEEL. Поиск выполнялся по сайтам:

<http://www.patents.ibm.com>, www.patents.uspto.gov – США;
www.ep.espasenet.com – Европа,
www.fips.ГЦ – Россия.

Всего выбрали 2561 патент, которые затем были рассортированы, прежде всего по химическому составу и отличительным признакам. Некоторые иностранные патенты в описании не содержали данных о химическом составе, в них указаны только соотношения нитридных, карбидных, карбонитридных фаз и их поведение. После анализа описания такого количества патентов создалось впечатление, что, скорее всего, многие из патентов принципиально мало отличаются от выбранного базового прототипа или аналога, а несущественные различия продиктованы необходимостью обоснования отличия при подаче заявки на изобретение. Действительно, при таком обилии патентов на марки стали этого класса в нормативных документах их присутствует в десятки раз меньше, чем запатентовано, а в промышленности используется не более десятка.

На рис. 1 показано частотное распределение основных элементов по сделанной выборке марок сталей из нормативных документов и патентов. Как видно из рисунка, для штамповых сталей горячего деформирования класса 5ХНМ содержание таких элементов, как углерод, кремний и молибден, находится в основном в интервале 0,3...0,6% при среднем значении \bar{x} около 0,4%, а содержание марганца, хрома и никеля – в основном в интервале 0,40...1,35% при среднем значении около 0,9%. Именно эти элементы и определяют физико-механические свойства стали в готовом изделии.

Рассмотрим влияние указанных химических элементов стали, разделив их на две группы. В первую группу входят Ni, Mn, Co, C, N и Cu, которые расширяют область твердых растворов на основе γ -железа, во вторую – элементы, суживающие область, а в определенных концентрациях – и выклинивающие ее полностью. К этим элементам относятся Cr, W, Mo, V, Ti, Si, Al, S, P, Nb, Zr. Кроме того, следует кратко рассмотреть особенности изменения концентрационных и температурных границ существования α - и γ -фаз в сталях, содержащих различное количество углерода. Все элементы, обычно присутствующие в составе штамповых сталей, за исключением ванадия, уменьшают концентрацию углерода в эвтектоиде (перлите). Наиболее сильное воздействие на положение точки s на диаграмме Fe–C оказывают молибден и вольфрам. Наряду с делением легирующих элементов на группы по влиянию их на полиморфные превращения железа основу классификации может составлять склонность этих элементов к карбидообразованию; Ni, Co, Mn и Si собственных карбидов в сталях не образуют, остальные элементы по степени сродства к углероду можно расположить в порядке их возрастания в виде ряда: Fe, Cr, Mo, W, V, Ti, Nb, Zr.

В соответствующей литературе по инструментальным сталям достаточно подробно описано влияние основных химических

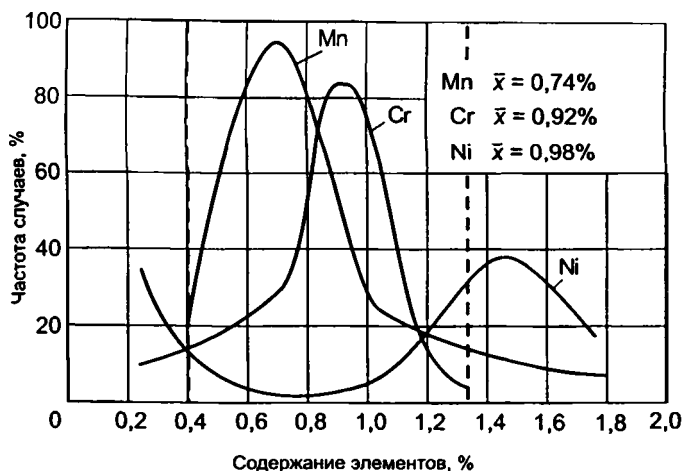
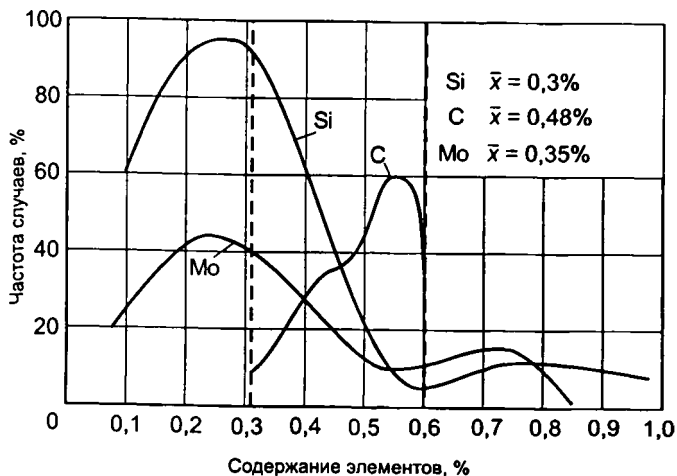


Рис. 1. Распределение химических элементов по выборке сталей класса 5XHM

элементов, в том числе в различных сочетаниях, на формирование микроструктуры и физико-механических свойств стали при горячей деформации, а также после термообработки. При выборе марки стали для требуемого инструмента необходимо учитывать также ее стоимость, которая в настоящее время высока. В последнее время произошел рост цен на ферросплавы. Например, закупочная цена никеля для металлургического завода се-

годня достигает 19 000 долларов за тонну, а молибдена – до 70 000 долларов. Нельзя не учитывать способ выплавки и коэффициент усвоения ферросплава при выплавке. Например, при выплавке стали в электродуговых печах принимают следующие значения коэффициента усвоения ферросплавов и легирующих элементов: FeCr800 – 0,8; FeV40 – 0,75; FeNb – 0,65; Co – 0,6; Zr – 0,6; PЗМ – 0,7; FeTi30 – 0,30.

В качестве первого шага при статистическом анализе данных химического состава выбранных марок сталей был выполнен расчет углеродного эквивалента по каждой марке стали ($C_{\text{экв}}$) по формуле

$$C_{\text{экв}} = C + \frac{\text{Mn} + \text{Si}}{6} + \frac{\text{Cr} + \text{V} + \text{Mo} + \text{W}}{5} + \frac{\text{Ni} + \text{Co}}{15} + \Sigma(\text{Al}, \text{Ti}, \text{B}, \text{Zr}, \text{Ca}).$$

Как показали результаты анализа, углеродный эквивалент не дает необходимой информации, так как основная доля в этой формуле приходится на углерод.

Далее были проанализированы присутствующие в патентах и литературе различные соотношения элементов:

$$0,43 \leq C + \frac{\text{Mn}}{6} \leq 0,6; \quad 0,35 \leq \frac{\text{V}}{\text{C}} \leq 0,9; \quad 175 \leq \frac{\text{Ti} + \text{V}}{\text{B}} \leq 228;$$

$$5 \leq \frac{\text{V}}{\text{Ti}} \leq 8; \quad 20 \leq \frac{\text{Ti}}{\text{B}} \leq 40; \quad 0,2 \leq \frac{\text{B}}{\text{Ca}} \leq 0,6;$$

$$72 \leq \frac{\text{Al}}{\text{B}} \leq 162; \quad 0,5 \leq \text{Cr} + \text{Co} \leq 1,3; \quad 3,1 \leq \frac{\text{Ni}}{\text{B} \cdot 100} \leq 6,3.$$

Анализ перечисленных соотношений при сопоставлении их влияния с данными по изменению микроструктуры и технологических свойств стали в готовом штампе позволяет сделать предположение, что некоторые из приведенных соотношений являются надуманными и не отражают физических процессов, происходящих в структуре металла при производстве штамповых сталей и тем более при термообработке, включая и азотирование.

Кратко обобщим известные данные по влиянию химических элементов в исследуемых пределах (см. рис. 1) на свойства стали.

Хром увеличивает прочность стали, образуя карбиды, и оказывает влияние в сочетании с углеродом, никелем, молибденом, бором и титаном. Молибден и вольфрам увеличивают теплостойкость. Молибден заменяет вольфрам и в сочетании с хромом повышает прокаливаемость. Ванадий улучшает равномерность распределения химических элементов в стали. При увеличении содержания ванадия

можно повышать содержание никеля. При содержании хрома в пределах 1,5...2,0% хороший эффект дает увеличение содержания ванадия, молибдена, никеля (до 0,8% каждого). Кремний и кобальт способствуют сохранению мелкого зерна при нагреве и повышают теплостойкость. Хороший эффект обеспечивает сочетание кремния (0,6...0,8%) и кобальта (0,5...0,8%). Никель и марганец увеличивают прокаливаемость, что важно для крупногабаритных штампов, и повышают ударную вязкость. Бор, титан и никель образуют карбиды, нитриды и бориды, увеличивают предел выносливости стали. Цирконий и в меньшей степени ниобий и титан повышают вторичную стойкость и теплостойкость.

Как видно из рис. 1, распределение элементов не всегда подчиняется нормальному закону распределения. Полагая, что при большом массиве данных мы имеем незначительную ошибку в выбранной гипотезе, принимаем нижеследующее.

Найденные распределения не случайны и базируются на большом эмпирическом опыте. Если привести распределения химических элементов к безразмерному виду $(x_i - \bar{x})/\bar{x}$, то, наложив их друг на друга, можно выделить области распределений элементов. С использованием полученных результатов определим физически обоснованные соотношения элементов, а также их интервалы по различным элементам. Исследовательская часть работы в этом случае опускается и найденные соотношения приводятся в готовом виде:

$$0,55 \leq \frac{V + Ti}{C} \leq 1,5 \quad \text{при} \quad C = 0,40 \dots 0,55; Ti = 0,1 \dots 0,2; V = 0,2 \dots 0,4;$$

$$4 \leq \frac{Mn + Ni}{Ti} \leq 60 \quad \text{при} \quad Mn = 0,4 \dots 1,5; Ni = 0,4 \dots 1,5; Ti = 0,05 \dots 0,2;$$

$$2 \leq \frac{Cr + Mo}{Co} \leq 10 \quad \text{при} \quad Co = 0,2 \dots 0,5; Cr = 0,5 \dots 1,2; Mo = 0,5 \dots 0,8;$$

$$0,6 \leq \frac{Ni + Mo}{Ti + B} \leq 10,5 \quad \text{при} \quad Ni = 0,4 \dots 0,9; Mo = 0,3 \dots 0,6; Ti = 0,05 \dots 0,2; B = 0,0015 \dots 0,002;$$

$$3,5 \leq \frac{Si + Co}{100 \cdot B} \leq 9,3 \quad \text{при} \quad Si = 0,5 \dots 0,9; Co = 0,2 \dots 0,5; B = 0,0015 \dots 0,002.$$

Перечень найденных соотношений можно продолжить в процессе дальнейших исследований.

На основе выполненной работы был предложен и защищен авторским свидетельством Беларуси патент ВУ № 6728 «Штамповая сталь», приоритет 2001.01.22 С 22С 38/50. Штамповая сталь, содержащая углерод, кремний, марганец, хром, никель, молибден,

ванадий, алюминий, титан, бор и железо, отличающаяся тем, что дополнительно содержит цирконий при следующем соотношении компонентов, % (по массе): углерод 0,46...0,58; кремний 0,18...0,40; марганец 0,45...0,75; хром 0,8...1,2; никель 1,3...1,7; молибден 0,35...0,65; ванадий 0,18...0,25; алюминий 0,01...0,04; титан 0,02...0,04; бор 0,001...0,003; цирконий 0,02...0,04; железо – остальное. В стали этой марки необходимо выдерживать следующее соотношение ванадия, титана, углерода и циркония:

$$0,43 \leq \frac{V + Ti}{C} \leq 0,50; 8,7 \leq \frac{Ti + Zr}{100C} \leq 13,8.$$

На первый взгляд, сталь данной марки мало чем отличается по химическому составу от уже апробированной стали марки 45ХНМФЮТР (патент RU № 2040582 «Штамповая сталь». 1995.07.27 С 22С 38/54), которая была внедрена на Белорусском металлургическом заводе, однако имеет свои отличия по свойствам и технологии производства. Например, чтобы бор связывал азот, образуя нитриды, необходимо в процессе раскисления и вакуумирования добиться содержания кислорода в стали не более 10 ppm. Новая штамповая сталь имеет хорошие технологические свойства уже в непрерывнолитой заготовке сечением 250×300 мм. Так, теплостойкость стали, которую оценивали по твердости после 4 ч выдержки при температуре 640 °С по пяти образцам, НРС = 42...44. Предел прочности при 600 °С равен 900 МПа на поверхности непрерывнолитой заготовки и 890 МПа в ее центре. Предел выносливости – соответственно 1205 и 1092 МПа.

Сталь с предложенным новым химическим составом относится к штамповым сталям класса 5ХНМ для горячего деформирования, но имеет более высокие технологические и эксплуатационные показатели при работе штампового инструмента. Эта сталь рекомендована к освоению на РУП «БМЗ», что является продолжением работы по выпуску белорусских штамповых сталей типа 45ХНМФЮТР (БИС1), 45ХНМФ1ЮТ (БИС2), которые в 1991 – 1994 гг. производились по техническим условиям ТУ РБ 14-840-20–92 в сортовом круге диаметром 80...150 мм и хорошо себя зарекомендовали на инструментальных заводах Беларуси и России.

Высокое качество белорусских сталей БИС1 и БИС2 при их использовании на инструментальных заводах подтверждено актами внедрения. Так, на ПО «Минсктракторозапчасть» стойкость оснастки по сравнению со стойкостью оснастки из стали 5ХНМ увеличилась в 1,4 – 1,5 раза, на заводе «Автогидроусилитель» (г. Борисов) стойкость штампов выросла в 1,8 – 2 раза, на заводе СИиТО ПО «Гомсельмаш» – в 2,2 раза. Новая марка стали по патенту ВУ № 6728 имеет более высокие показатели качества по сравнению с марками 5ХНМ и БИС1, БИС2. Эта сталь сопровождается при поставке полным описанием технологии изготовления и термической обработки инструмента у потребителя.