



МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 669.15

С.П. РУДЕНКО, канд. техн. наук
ведущий научный сотрудник¹
E-mail: sprud.47@mail.ru

А.Л. ВАЛЬКО
старший научный сотрудник¹
E-mail: valcoalex@gmail.com

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступил в редакцию 10.06.2017.

ВЛИЯНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА НА АНИЗОТРОПИЮ ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Рассмотрено влияние металлургического качества на анизотропию пластических свойств конструкционных сталей. Показано, что при увеличении содержания серы в стали значительно повышается ее полосчатость и анизотропия такого параметра механических свойств, как ударная вязкость. Получено, что для особовысококачественных сталей при предельном содержании серы значения ударной вязкости при продольном и поперечном направлении волокон различаются в 6–8 раз.

Ключевые слова: конструкционные стали, металлургическое качество, содержание серы, направления волокон, анизотропия, ударная вязкость

При классификации сталей используется понятие о категории качества, главным показателем которой является предельно допустимое содержание фосфора и серы (ГОСТ 4543–71). Содержание именно этих примесей влияет в первую очередь на свойства сталей. В более широком смысле под качеством стали понимают совокупность свойств, определяемых металлургическим процессом ее производства [1], и в этом смысле оно равнозначно понятию металлургическое качество стали [2].

Большинство металлургических дефектов стали зарождается в процессе кристаллизации слитков, в которых формируются усадочные раковины, пористость, газовые пузыри, химическая зональная неоднородность (ликвация), дендритная неоднородность, пятнистость, шлаковые включения, ниточные или пленочные сегрегации, усы, трещины и т. п. [3, 4]. Большинство из этих дефектов в процессе последующей обработки, в основном при прокатке, изменяют свою форму и размеры.

Зоны кристаллизации при последующей горячей прокатке претерпевают значительные изменения. В горячедеформированном металле вместо

равноосных зерен формируются волокна — структурные элементы, вытянутые вдоль направления прокатки. Волокнистость обусловлена присутствием неметаллических включений и химической неоднородностью слитка (карбидной или структурной полосчатостью) [5, 6].

Пластичные неметаллические включения (сульфиды, силикаты) вытягиваются, а хрупкие, дробясь, образуют строчки, ориентированные вдоль направления течения металла, способствуют тем самым образованию ориентированной макро- и микроструктуры. Вытянутые частицы силикатов и сульфидов способствуют возникновению ферритной полосчатости [2].

При химической неоднородности слитка волокнистость возникает вследствие деформации чередующихся обедненных (оси дендритов) и обогащенных (междендритные объемы) участков отливки. При этом в микроструктуре обнаруживается структурная полосчатость (в малоуглеродистых сталях) или карбидная неоднородность (в высокоуглеродистых сталях).

Макроструктурная волокнистость — причина анизотропии. Если литые сплавы изотропны,

т. е. имеют практически одинаковые свойства в различных направлениях испытаний, то горячедеформированные имеют более высокие механические свойства вдоль волокна и пониженные свойства в поперечном направлении [5]. Направление волокна оказывает существенное влияние на прочностные свойства и пластические характеристики высокопрочных сталей. Причем в продольном направлении волокнистости механические характеристики выше, чем в поперечном. Степень анизотропности увеличивается с ростом степени деформации и количества неметаллических включений.

Для обеспечения максимальной работоспособности деталей выбор направления волокна в изделии имеет большое значение. Особенно это необходимо для деталей, где возможно хрупкое или усталостное разрушение. Для зубчатых колес, работоспособность которых лимитируется сопротивлением усталости при изгибе зубьев, волокно должно копировать очертания зуба. Для боковых поверхностей зубьев, разрушающихся из-за поверхностной контактной усталости (питтинга), весьма неблагоприятен выход волокна на поверхность под острым углом, поскольку трещины поверхностной усталости зарождаются и развиваются в плоскостях, расположенных под углом 30° к поверхности. Для зубчатых колес, работоспособность которых лимитируется сопротивлением глубинной контактной усталости активных поверхностей зубьев, направление волокна, копирующее эвольвентный профиль зуба, является неблагоприятным.

Исследование влияния отдельных типов неметаллических включений на механические или усталостные свойства стали промышленных плавок не представляется возможным из-за большого количества переменных величин, характеризующих неметаллические включения (состав, размер, форма, количество и т. д.). Указанные исследования обычно проводятся на особом металле, технология выплавки которого обуславливает преобладающее количество какого-либо одного типа неметаллических включений. В данной работе приведены результаты исследований

влияния на пластические свойства проката металлургического качества конструкционных сталей, оцениваемого содержанием в прокате серы, которая практически находится в виде сульфидов железа и марганца.

Методика исследований. Исследовались образцы из конструкционных сталей 25ХГНМ, 20ХНЗА, 14ХНЗМА, 21ХГНМА. Испытания на растяжение проводили по ГОСТ 1497-84, испытания на ударную вязкость при нормальной температуре проводили на образцах типа I по ГОСТ 9454-78 на маятниковом копре PСWО 30.

Для металлографических исследований использовали оптические микроскопы МИМ-8М, НЕОРНОТ 32 при увеличении 100. Электронная микроскопия выполнялась на сканирующем электронном микроскопе Vega II LMU (Tescan, Чехия). Металлографические шлифы исследовали после травления в специальном реактиве [7].

Результаты исследований. В таблице 1 приведены марки исследованных плавок сталей с указанием номеров плавок и их производителей. В таблице 2 приведен химический состав исследованных марок сталей. Результаты испытаний механических свойств, в том числе на ударный изгиб продольных и поперечных образцов, приведены в таблице 3.

Из приведенных результатов видно, что стали с повышенным содержанием серы 0,013–0,014 % произведены на ЗАО «Металлургический завод «Петросталь». Согласно ГОСТ 4543-71 при таком содержании серы сталь относится к особовысококачественной. Стали с самым малым содержанием серы 0,003% произведены на ОАО «Ижсталь».

Обобщая полученные результаты, следует отметить, что увеличение содержания серы в стали от 0,003 % до 0,014 % практически не влияет на регламентируемые ГОСТ и ТУ механические свойства конструкционных сталей.

Однако содержание серы оказывает влияние на анизотропию пластичности в продольном и поперечном направлении волокон. При содержании серы 0,013–0,014 % значительно понижается вязкость в поперечном направлении и, следовательно, увеличивается анизотропия. В этом

Таблица 1 — Марки исследованных плавок сталей

| № п/п | Марка стали | Номер плавки | Изготовитель |
|-------|-------------|--------------|---------------------|
| 1 | 25ХГНМ | 64541 | ЗАО МЗ «Петросталь» |
| 2 | 25ХГНМ | 75485 | |
| 3 | 20ХНЗА | Э82587 | ОАО «Ижсталь» |
| 4 | 14ХНЗМА | 7Э82764 | ПАО «ЧКПЗ» |
| 5 | 14ХНЗМА | 7К7066 | ОАО «Ижсталь» |
| 6 | 14ХНЗМА | 7К7190 | |
| 7 | 21ХГНМА | 13К20797 | |

Таблица 2 — Химический состав исследованных марок сталей

| № п/п | Марка стали | C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Mo | Cu | Al |
|-------|-------------|-------|------|-------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|
| 1 | 25ХГНМ | 0,21 | 0,23 | 0,90 | 0,011 | 0,013 | 0,90 | 0,78 | 0,19 | 0,21 | 0,024 |
| 2 | 25ХГНМ | 0,215 | 0,29 | 0,93 | 0,015 | 0,014 | 0,91 | 0,82 | 0,19 | 0,17 | 0,027 |
| 3 | 20ХН3А | 0,21 | 0,29 | 0,415 | 0,006 | 0,008 | 0,71 | 2,72 | 0,008 | 0,042 | 0,029 |
| 4 | 14ХН3МА | 0,14 | 0,28 | 0,70 | 0,014 | 0,005 | 1,47 | 3,15 | 0,13 | 0,10 | 0,04 |
| 5 | 14ХН3МА | 0,13 | 0,28 | 0,65 | 0,005 | 0,007 | 1,39 | 3,29 | 0,12 | 0,09 | 0,023 |
| 6 | 14ХН3МА | 0,15 | 0,34 | 0,81 | 0,009 | 0,008 | 1,50 | 3,16 | 0,12 | 0,14 | 0,012 |
| 7 | 21ХГНМА | 0,21 | 0,32 | 0,87 | 0,005 | 0,003 | 0,52 | 0,50 | 0,41 | 0,18 | 0,024 |

Таблица 3 — Механические свойства исследованных марок сталей

| № п/п | Марка стали | Номер плавки | $\sigma_{p,r}$, МПа | $\sigma_{T,r}$, МПа | δ , % | Ψ , % | KCU , Дж/см ² Прод. | KCU , Дж/см ² Попер. | C, % | S, % | Δ |
|-------|-------------|--------------|----------------------|----------------------|--------------|------------|----------------------------------|-----------------------------------|------|-------|----------|
| 1 | 25ХГНМ | 64541 | 1280 | 1150 | 13 | 54 | 157 | 24 | 0,21 | 0,013 | 6,5 |
| 2 | 25ХГНМ | 75485 | 1200 | 1090 | 13 | 51 | 158 | 21 | 0,22 | 0,014 | 7,5 |
| 3 | 20ХН3А* | Э82587 | 1080 | 1000 | 14 | 68 | 140 | 46 | 0,21 | 0,008 | 3,0 |
| 4 | 14ХН3МА | 7Э82764 | 1395 | 1300 | 16 | 56 | 147 | 79 | 0,14 | 0,005 | 1,9 |
| 5 | 14ХН3МА | 7К7066 | 1490 | 1345 | 19 | 70 | 190 | 95 | 0,13 | 0,007 | 2,0 |
| 6 | 14ХН3МА | 7К7190 | 1120 | 920 | 13 | 56 | 140 | 58 | 0,15 | 0,008 | 2,4 |
| 7 | 21ХГНМА | 13К20797 | 930 | 800 | 24 | 73 | 95 | 67 | 0,21 | 0,004 | 1,4 |

Примечание: * — отпуск 200 °С; $\Delta = KCU_{\text{прод}} / KCU_{\text{попер}}$

случае величина $\Delta = KCU_{\text{прод}} / KCU_{\text{попер}}$ составляет 6,5–7,5, причем большие величины Δ соответствуют большему содержанию углерода в стали (см. таблицу 3).

При снижении массовой доли серы до 0,003–0,008 % анизотропия ударной вязкости значительно снижается, и величина Δ становится равной 1,4–2,4 (рисунок 1).

Полученную закономерность учитывают при выборе марки стали и способа ее выплавки для

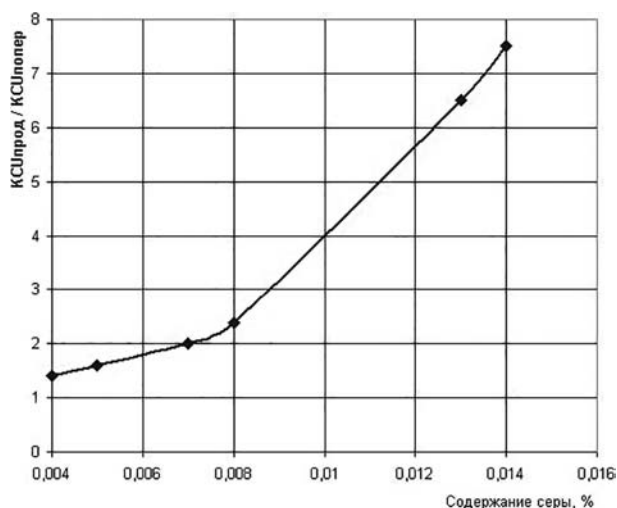


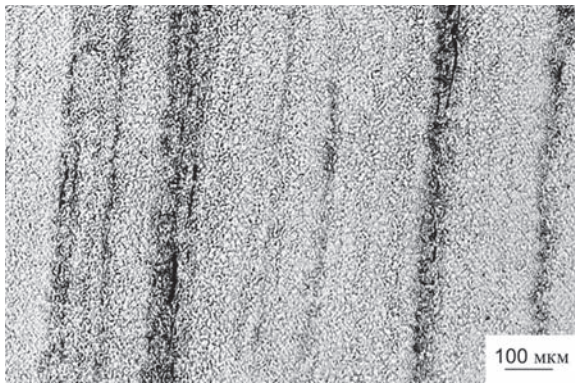
Рисунок 1 — Влияние содержания серы на анизотропию ударной вязкости конструкционных сталей

ответственных деталей, работающих в сложных эксплуатационных условиях при изгибных и контактных напряжениях, превышающих пределы выносливости материала. В частности, при рассмотрении требований к химическому составу американских сталей, применяемых для бурового инструмента, рекомендуют ориентироваться не на требования к стандартным сталям ASTM 4815H и 8720H (стандарт ASTM A 304), а на спецификации к этому стандарту, содержащие более высокие требования к металлургическому качеству сталей.

На рисунке 2 приведена микроструктура испытанного на ударную вязкость продольного образца из стали 25ХГНМ с ярко выраженной полосчатостью при содержании серы 0,013% (см. таблицу 3, образец № 1). Расстояние между полосами составляет от 150 до 400 мкм при средней разности микротвердости полос и осей макроволокна 50 HV_{0,5} (5 HRC).

Микроструктура продольного образца № 3 (рисунок 3) из стали 20ХН3А с низким содержанием серы 0,008 % S отличается невыраженной полосчатостью с расстоянием между полосами около 100 мкм при средней разности микротвердости полос и осей макроволокна 17 HV_{0,5} (1,5 HRC).

Вид изломов разрушенных при испытаниях на ударную вязкость продольного и поперечного образцов из стали 14ХН3МА (см. таблицу 3, образец № 6) приведен на рисунке 4, из которого видно,



a



б

Рисунок 2 — Микроструктура продольного образца № 1 из стали 25XГНМ (плавка 64541): *a* — травление по патенту [7]; *б* — без травления

что излом поперечного образца волокнистый, без признаков шиферности и расслоения (*a*), а излом продольного — однородно плотный (*б*), что объясняется низким содержанием серы как основного ликвирующего элемента.

Плавка стали ЗАО «Металлургический завод «Петросталь» (№ 2 в таблице 2) содержит 0,014 % серы и отличается выраженной полосчатостью. Исследование разрушенных поперечных образцов на сканирующем электронном микроскопе позволило выявить наличие в изломе вытянутых вдоль волокна включений MnS (рисунок 5). Если в матрице содержание марганца равно 0,42 %, то в сульфидах его концентрация достигает 46 %

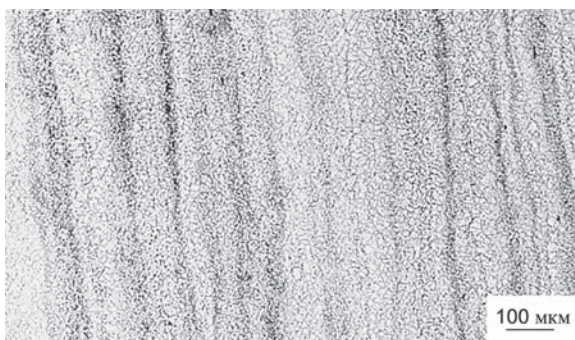
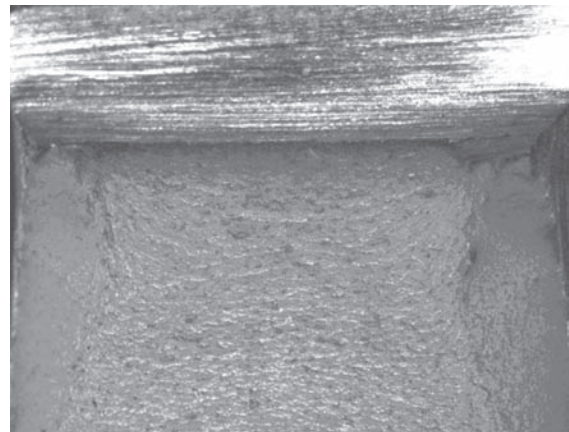


Рисунок 3 — Микроструктура продольного образца № 3 из стали 20ХН3А (плавка 82587), выявленная травлением по патенту [7]

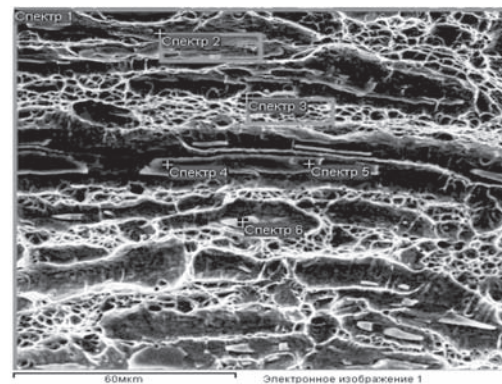


a



б

Рисунок 4 — Вид изломов разрушенных при испытаниях на ударную вязкость продольного и поперечного образцов из стали 14ХН3МА, плавка 7К7190, содержание серы — 0,06 %: *a* — поперечный образец; *б* — продольный образец



| Спектр | В стат. | C | Al | Si | S | Cr | Mn | Fe | Ni | Итого |
|----------|---------|-------|------|------|-------|------|-------|--------|------|--------|
| Спектр 1 | Да | 3.58 | | 0.37 | 1.09 | 0.78 | 2.08 | 90.15 | 1.95 | 100.00 |
| Спектр 2 | Да | 9.68 | | 0.51 | | 0.71 | 13.91 | 74.24 | 0.95 | 100.00 |
| Спектр 3 | Да | 12.32 | | | 0.16 | 0.79 | 0.71 | 84.55 | 1.47 | 100.00 |
| Спектр 4 | Да | 39.41 | 0.82 | | | 2.13 | 4.59 | 52.64 | 0.42 | 100.00 |
| Спектр 5 | Да | | | | | | | 100.00 | | 100.00 |
| Спектр 6 | Да | 12.75 | 0.11 | 0.13 | 29.30 | 0.58 | 42.16 | 14.97 | | 100.00 |
| Макс. | | 39.41 | 0.82 | 0.51 | 29.30 | 2.13 | 42.16 | 100.00 | 1.95 | |
| Мин. | | 3.58 | 0.11 | 0.13 | 0.16 | 0.58 | 0.71 | 14.97 | 0.42 | |

Рисунок 5 — Электронные изображения излома поперечного образца из стали 25XГНМ

(см. рисунок 5, спектр 6). Несмотря на содержание серы, не превышающее рекомендованного ГОСТ 4543 для особовысококачественных сталей предела, микроструктурная полосчатость существенно понизила ударную вязкость $KCU_{\text{попер}}$ поперечных образцов (см. № 2 таблицы 3).

Заклучение. Рассмотрено влияние металлургического качества на анизотропию пластических свойств конструкционных сталей. Показано, что при увеличении содержания серы в стали значительно повышается ее полосчатость и анизотропия такого параметра механических свойств, как ударная вязкость. Получено, что для особовысококачественных сталей при предельном содержании серы 0,015% значения ударной вязкости при продольном и поперечном направлении волокон могут различаться в 6–8 раз. Полученные результаты имеют большое значение при выборе марки стали и способа ее выплавки для ответственных деталей, эксплуатирующихся в условиях многоосного напряженно-деформирования состояния.

RUDENKO Sergei P., Ph. D. in Eng.

Leading Researcher¹

E-mail: sprud.47@mail.ru.

VALKO Alexander L.

Senior Researcher¹

E-mail: valcoalex@gmail.com

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 10 June 2017.

INFLUENCE OF METALLURGICAL QUALITY ON ANISOTROPY OF PLASTIC PROPERTIES OF CONSTRUCTIONAL STEELS

Influence of metallurgical quality on anisotropy of plastic properties of constructional steels is considered. It is shown, that at increase in the maintenance of sulfur in a steel considerably raise striation and anisotropy of such parameter of mechanical properties, as impact strength. It is received, that for extra high tensile steels at the limiting maintenance of sulfur of value of impact strength at a longitudinal and cross-section direction of fibers differ 6–8 times.

Keywords: constructional steels, metallurgical quality, the maintenance of sulfur, a direction of fibers, anisotropy, impact strength

References

1. Dalsky A.M. [et al.] *Tehnologija konstrukcionnyh materialov* [Technology of constructional materials]. Moscow, Mashinostroenie, 2003. 512 p.
2. Goldstein M.I., Grachev S.V., Wexler Yu.G. *Specialnye stali* [Special steels]. Moscow, MISIS, 1999. 408 p.
3. Kalinina Z.M. *Defekty legirovannyh stalej* [Defects of the alloyed steels]. Sverdlovsk, Metallurgizdat, 1960. 248 p.
4. Ezhov A.A., Gerasimova L.P. *Defekty v metallah* [Defects in metals]. Moscow, Russkij Universitet, 2002. 360 p.
5. Braun M.P. *Vlijanie legirujushchih jelementov na svojstva stali* [Influence of alloying elements on properties of steel]. Kiev, Gostehizdat USSR, 1962. 192 p.
6. Grigorovich, V.K. Racionalnoe raspolozhenie volokna v stalnyh izdelijah [A rational arrangement of fiber in steel products]. *Metallovedenie i termicheskaja obrabotka stali* [Metallurgical science and heat treatment of steel], Moscow, Metallurgizdat, 1962, no. 2, pp. 951–960.
7. Valko A.L., Rudenko S.P., Mosunov E.I., Mihljuk A.I. *Metallograficheskij reaktiv dlja vyjavenija mikrostruktury cementovannoj konstrukcionnoj stali* [Metallographic reagent for detection of microstructure of cemented structural steel]. Patent RB, no. 15273, MPK S 23 F 1/28 /, 2011.