

УДК 669.018 (076.5)

Белевитин В. А.  
Смирнов Е. Н.  
Синицын А. А.  
Коваленко С. Ю.

## ОСНОВАНИЯ НЕОБХОДИМОСТИ УЧЕТА НЕСОВЕРШЕНСТВ КУЗНЕЧНОГО СЛИТКА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПРОЦЕССА КОВКИ НА ПРЕССАХ

Несмотря на ряд очевидных преимуществ прокатки перед ковкой, доля последней на рынке металлов постоянно возрастает. Обусловлено это тем, что ковка, как один из основных универсальных процессов обработки металлов давлением, в большей степени обеспечивает повышение качества металла посредством преобразования литой структуры в деформированную, а также исправления дефектов и несовершенств (осевой и внеосевой структурной ликвации, несплошностей усадочного происхождения – усадочной рыхлости и пористости, неметаллических включений, химической неоднородности) которые неизбежно изначально присутствуют в слитках и переходят в деформированную заготовку [1]. Особенно актуальна данная проблема для условий производства крупногабаритных полуфабрикатов с высокими качественными характеристиками, а именно: валов диаметром свыше 260–280 мм, толстых листов (плит) толщиной свыше 200 мм, а также трубных и кольцевых заготовок.

В свете вышесказанного построение режима (технологии)ковки, с одной стороны, должно быть таким, чтобы в зависимости от степени пораженности слитка дефектами и несовершенствами для необходимых габаритов поковок (по отношению к исходному слитку) получить требуемый уровень и распределение физико-механических и иных свойств, а именно – отсутствие скоплений неметаллических включений, несплошностей и других внутренних дефектов свыше определенных стандартами размеров. С другой стороны, уже в процессе шихтовки, ведения плавки, выпечной обработки, разливки и тепловой выдержки слитков должны быть заложены предпосылки для успешного получения поковок высокого качества. В целом можно предположить, что наивысшие свойства металла поковок гарантированно достигаются при соблюдении определенного баланса от действия множества организационно-технологических факторов при выплавке стали, отливке и ковке слитков, термической обработке получаемых полуфабрикатов.

Среди наиболее значимых требований зарубежных заказчиков, вызывающих определенные трудности их гарантированного выполнения с минимальной долей отбраковки, выделяются следующие:

- марка стали (согласно SEW 550/76, DIN 17201, а предпочтительнее EN 10083 1/91) с предельными отклонениями по элементам по результатам химического анализа проб от каждой поковки);
- размер зерна (преимущественно, 5–8 по ASTM E 112 или NFA 04.102);
- содержание неметаллических включений (по ASTM E 45-95a, метод А, ≤ А3-В3-С3-Д3);
- отсутствие внутренних дефектов по результатам ультразвукового контроля, превышающих требования стандарта SEP 1921, группа Ш, класс С/с;
- допустимые отклонения по результатам испытаний образцов для контроля механических свойств (по DIN 17201), особенно на вязкость разрушения.

Ковка в состоянии значительно снизить, но не беспредельно, вредное влияние дефектов и несовершенств кузнечного слитка и повысить, тем самым, качество конечного продукта: не раскрыть внутренние несплошности слитка; закрыть или заварить дефекты литого металла; раздробить дендриты и рассредоточить крупные скопления неметаллических включений [2]. В этой связи, сталеплавильному производству должно быть также уделено пристальное внимание: чем строже и тщательнее соблюдение технологических параметров плавки стали и разливки слитков, тем в большей степени последние оказываются свободными от внутренних и поверхностных дефектов, которые неизбежно переходят в деформированную заготовку, а также минимизируется химическая и структурная неоднородность (неоднородность микроструктуры).

Структурная и химическая неоднородности сопутствуют друг другу, взаимно усиливая отрицательное влияние на пластичность металла слитка, и зависят от массы слитка, отношения его длины к поперечному размеру, конусности, условий затвердевания, формы поперечного и продольного сечений [3]. Резкое повышение содержания углерода, серы и фосфора в осевой зоне подприбыльной части слитков и ликвационных зонах сопровождается наибольшим числом внутренних дефектов слитков в тех же зонах осевой (V-образной ликвации) и внеосевой ( $\Lambda$ -образной ликвации).

С позиций расширения сортамента качественных поковок особый интерес представляет проблема уплотнения и заварки за счет интенсификации сдвиговых деформаций (скоростей деформаций) и перераспределения накопленной деформации в объеме подвергаемых пластическому формоизменению кузнечных слитков его внутренних дефектов. При этом, как показывают полученные с применением гипотезы изотропности и многократно проверенные практикой результаты [3], закономерности объемного течения подвергаемого пластической деформации металла должны использоваться с поправками, учитывающими реальное строение слитка со всеми вытекающими отсюда последствиями. В частности, из-за различного характера осевой и внеосевой структурной ликвации, несплошностей усадочного происхождения, неметаллических включений, а, прежде всего, скоплений сульфидов I-го и II-го типа, эвтектических сульфидов, химической неоднородности и прочих факторов для отличающихся по массе слитков, в каждом конкретном случае необходима корректировка режимовковки, обеспечивающих выполнение требований заказчика.

Целью работы является исследование влияния особенностей разлива стали в изложницы, макроструктуры и химической неоднородности кузнечных слитков на достигаемый уровень качества металла поковок валов диаметром свыше 260–280 мм.

В контексте всего вышеизложенного в качестве объекта исследования были выбраны кузнечные слитки массой 5,6 т, 8,0 т и 10,0 т из стали 45. Из вышеназванных слитков методомковки изготавливались поковки валов.

Предельные концентрации и относительное содержание химических элементов в исследуемых кузнечных слитках приведены в табл. 1.

Таблица 1

Предельные концентрации и относительное содержание химических элементов в кузнечных слитках массой 5,6 т, 8 т и 10 т из стали 45 по ГОСТ 1050-88

Химические элементы	Концентрация (min, max) и относительное содержание ( $\mathcal{E}_{\min}$ и $\mathcal{E}_{\max}$ в ковшевой пробе, $\mathcal{E}_{\text{пл}}$ в плавке на выпуске) химических элементов в кузнечных слитках массой:											
	5,6 тн				8 тн				10 тн			
	min	max	$\mathcal{E}_{\min}/\mathcal{E}_{\text{пл}}$	$\mathcal{E}_{\max}/\mathcal{E}_{\text{пл}}$	min	max	$\mathcal{E}_{\min}/\mathcal{E}_{\text{пл}}$	$\mathcal{E}_{\max}/\mathcal{E}_{\text{пл}}$	min	max	$\mathcal{E}_{\min}/\mathcal{E}_{\text{пл}}$	$\mathcal{E}_{\max}/\mathcal{E}_{\text{пл}}$
C	0,40	0,53	0,85	1,17	0,38	0,55	0,81	1,21	0,36	0,57	0,79	1,23
S	0,020	0,046	0,81	1,24	0,021	0,054	0,76	1,35	0,023	0,059	0,68	1,47
P	0,012	0,017	0,88	1,18	0,016	0,022	0,89	1,20	0,018	0,025	0,88	1,26

Представленные на рис. 1 статистически обработанные результаты испытаний отгружаемых на экспорт валов из стали 45, полученных ковкой из слитков массой 5,6 т (зависимость 1) и 8,0 т (зависимость 2), свидетельствуют о значительном влиянии особенностей разлива стали в изложницы, макроструктуры и химической неоднородности кузнечных слитков на достижение требуемого уровня качества металла поковок. Полученные данные о величине предела текучести  $\sigma_m$  металла поковок на образцах от проб из осевой зоны подприбыльной части слитков (зоны V-образной ликвации) и от проб на расстоянии 1/3 от поверхности поковок, а также подприбыльной части (зоны  $\Lambda$ -образной ликвации) обнаруживают значительную его зависимость от пораженности слитка внутренними дефектами. Особенно ярко выраженная зависимость прослеживается в тангенциальном направлении.

Если на продольных образцах различия в величине отношения  $\hat{\sigma}_m$  (зона  $\Lambda$ -образной ликвации) к пределу  $\sigma_m^V$  (зона V-образной ликвации) для диапазона колебаний величины предела прочности от  $(\sigma_e)_{\min} = 490 \text{ Н/мм}^2$  до  $(\sigma_e)_{\max} = 630 \text{ Н/мм}^2$  не превышают в среднем

5,1 % в поковках, изготовленных из слитков массой 5,6 т и 9,8 % из слитков массой 10 т, то на тангенциальных образцах такие различия достигают 10,3% и 19,5% соответственно, т. е. выше, по меньшей мере, в два раза. Полученные результаты не противоречат данным С. Фернандеса [4] и работы [5], показывая хорошую с ними сходимость (при доверительной вероятности 0,95 коэффициент корреляции составляет 0,89).

Гидростатическое взвешивание, вырезанных из отстоящей на 1/3 от поверхности поковок зоны и из осевой зоны поковок, свидетельствует о том, что минимальную плотность имеют центральные слои металла, а максимальную – поверхностные, разность между которыми уменьшается по мере увеличения укова за счет уплотнения центральных слоев (рис. 2). При этом в расчет принимались лишь результаты испытаний поковок, отвечающих требованиям заказчика по данным ASTM E 112 или NFA 04.102 (метод А,  $\leq$  А3-В3-С3-Д3), так как в противном случае (метод А,  $>$  А3-В3-С3-Д3) наблюдается «разрыхляющее» воздействие неметаллических включений на деформируемый металл.

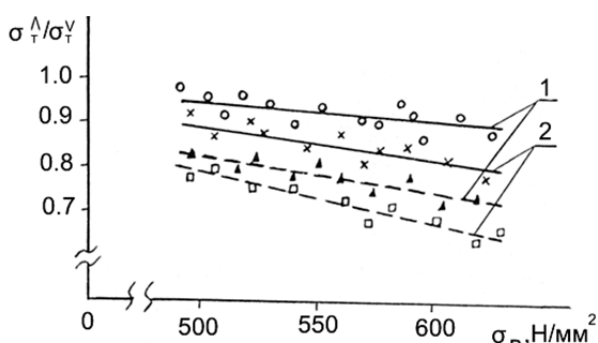


Рис. 1. Динамика изменения  $\sigma_m$  металла поковок валов из слитков массой 5,6 т (1) и 8,0 т (2) при уровне значимости 5 %:  
 ————— образцы, вырезанные в продольном направлении;  
 - - - - - образцы, вырезанные в тангенциальном направлении

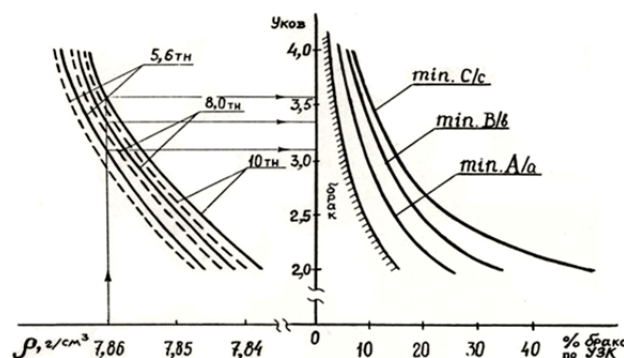


Рис. 2. Взаимосвязь плотности  $\rho$  металла поковок валов и результатов их неразрушающего контроля ультразвуковым методом (УЗК) при величине неметаллических включений менее А3-В3-С3-Д3 (метод А, ASTM E 112)

Подтверждением выявленному «разрыхляющему» воздействию неметаллических включений на деформируемый металл, могут служить представленные на рис. 3 аналогичные результаты, но для поковок с повышенным содержанием углерода, серы и фосфора в осевой зоне по отношению к их плавочному содержанию и величине неметаллических включений более А3-В3-С3-Д3 (метод А, ASTM E 112). У таких поковок традиционно обнаруживаются неметаллические включения с бальностью, по меньшей мере, на 0,5 выше, чем для отраженных на рис. 2 случаев. В большинстве случаев они имеют вид цепочки сульфидных включений. Можно предположить, что степень пораженности металла слитка химической и структурной неоднородностью определяет положение границы процессов залечивания и разрыхления пластически деформируемого металла в зависимости от реализуемой схемы напряженно-деформированного состояния.

Ход кривых на рис. 2 и рис. 3 показывает различия в достижении конечного результата по степени проработки литой структуры металла поковок, получаемых из слитков различной массы. Так плотность, наблюдаемая у поковок, отвечающих требованиям заказчика по данным ультразвукового контроля (SEP 1921, кл. 3, группа С/С), при использовании слитков массой 5,6 т достигается в случае обеспечения минимальной величины укова, равной 3,1. В то же время, использование слитков массой 8 т и 10 т дает тот же результат лишь при укове 3,4 и 3,6 соответственно. Естественно, что данные цифры могут быть скорректированы за счет варьирования величины подачи, угла кантовки и других технологических факторов. Однако общая тенденция остается неизменной: металл с большей степенью пораженности дефектами, снижающими его пластичность, требует повышенных затрат для одинакового конечного результата.

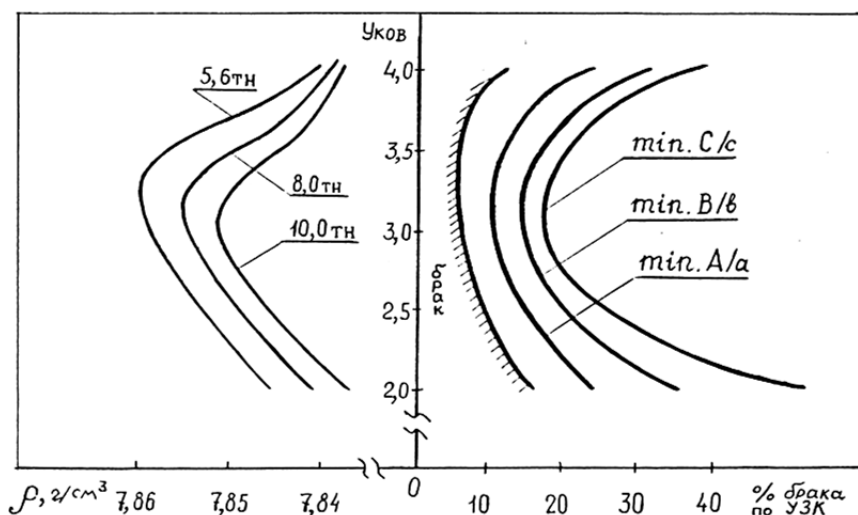


Рис. 3. Взаимосвязь плотности металла (сталь 45) поковок валов и результатов их неразрушающего контроля ультразвуковым методом (УЗК) при величине неметаллических включений более А3-В3-С3-D3 (метод А, ASTM E 112)

Анализ выборок пассивного эксперимента по разбраковке поковок типа валов, изготовленных из слитков массой 5,6 т, 8 т и 10 т с различной степенью развития химической и структурной неоднородности, с последующей статистической обработкой полученных результатов, а также данных специально поставленных исследований (балла неметаллических включений, изменения плотности металла и химической неоднородности) дал возможность определиться с некоторыми направлениями в совершенствовании процесса отливки кузнечных слитков, наиболее важными для изготовления ковкой качественной продукции. В частности, учет связи плотности металла и интенсивности ее изменения в осевой зоне поковки круглого сечения со степенью использования запаса пластичности [5] без оценки негативного влияния химической неоднородности и загрязнения металла неметаллическими включениями в свете наблюдаемых на практике данных контроля качества поковок по требованиям международных стандартов (см. рис. 2 и рис. 3) представляется недостаточно полным. Приведенные на рис. 4 результаты позволяют утвердиться в правильности такого подхода при объяснении причин неполного удовлетворения требований заказчиков. Без комплексного, многофакторного анализа [1], в том числе с использованием нейрокмпьютерных программных иммитатов [6–7] явно нелинейных функциональных зависимостей, трудно выделить всю гамму факторов, интенсифицирующих недопустимые отклонения.

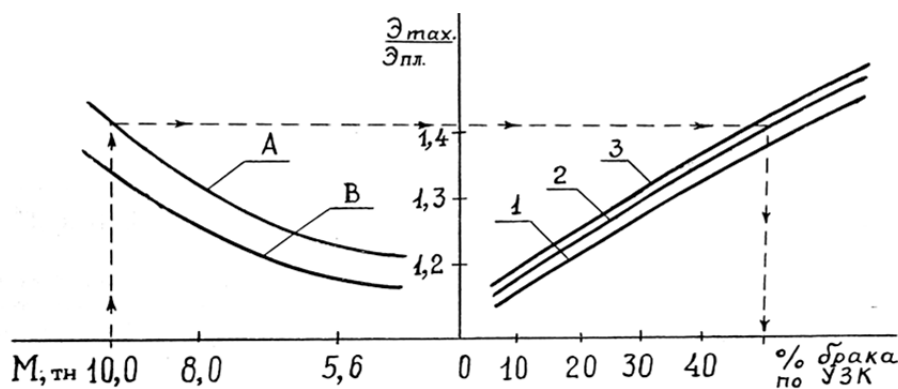


Рис. 4. Результаты неразрушающего ультразвукового контроля поковок валов, полученных протяжкой из слитков массой 5,6 т, 8 т и 10 т без продувки в сталеразливочном ковше (А) и с продувкой азотом (В):

1, 2, 3 – балл неметаллических включений 3,5, 3,0 и 2,5 соответственно (метод А по шкале А-В-С-Д, ASTM E 112)

## ВЫВОДЫ

Приведены результаты заводских исследований влияния макроструктуры и химической неоднородности кузнечных слитков массой 5,6 т, 8 т и 10 т из стали 45 на достижение требуемого уровня качества металла поковок валов диаметром свыше 260–280 мм.

Установлено, что слиткам текущего производства присуща значительная химическая неоднородность. Кроме того, анализ результатов механических свойств поковок на образцах от проб из осевой зоны подприбыльной части слитков (зоны V-образной ликвации) и от проб на расстоянии 1/3 от поверхности поковок, а также подприбыльной части (зоны Λ-образной ликвации) обнаруживают значительную их зависимость от пораженности слитка внутренними дефектами, включая химическую неоднородность, особенно ярко выраженную в тангенциальном направлении.

Фактически степень пораженности металла слитка химической и структурной неоднородностью определяет положение подвижной, в зависимости от реализуемой схемы напряженно-деформированного состояния, границы процессов залечивания и разрыхления пластически деформируемого металла.

Обнаруженные особенности влияния структурной и химической неоднородности на качество металла поковок закладывают основу для целенаправленного конструирования технологииковки в обеспечение выполнения требований международных стандартов.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Обработка металлов давлением в машиностроении* / П. И. Полухин, В. А. Тюрин, П. И. Давидков, Д. Н. Витанов. – М. : Машиностроение, София : Техника, 1983. – 279 с.
2. Тюрин В. А. *Теория и процессыковки слитков на прессах* / В. А. Тюрин. – М. : Машиностроение, 1979. – 240 с., ил.
3. *Экспериментальные методы механики деформируемых твердых тел: технологические задачи обработки давлением* / В. К. Воронцов, П. И. Полухин, В. А. Белевитин, В. В. Бринза. – М. : Металлургия, 1990. – 480 с., ил.
4. Fernandez S. *Segregaciones en aceros laminados y forjados* / S. Fernandez // *Revista Latino-americana de Siderurgia*. – Mayo, 1975. – № 181. – P. 47–56.
5. Темкин Б. О. *Разработка, исследование и внедрение технологических процессовковки валов с целью повышения качества осевой зоны* : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.03.05 / Борис Овсеевич Темкин. – Москва, 1978. – 22 с.
6. *Нейронные сети на персональном компьютере* / А. Н. Горбань, Д. А. Россиев. – Новосибирск : Наука; Сибирская издательская фирма РАН, 1996. – 276 с.
7. Sandberg I. W. *Approximation for Nonlinear Functionals* / I. W. Sandberg // *IEEE Trans. on Circuits and Systems. 1: Fundamental Theory and Applications*, Jan. – 1992. – Vol. 39, № 1. – P. 65–67.

Белевитин В. А. – д-р техн. наук, проф. ЧГПУ;

Смирнов Е. Н. – д-р техн. наук, проф. ДонНТУ;

Синицын А. А. – аспирант ЧГПУ;

Коваленко С. Ю. – аспирант ЧГПУ.

ЧГПУ – Челябинский государственный педагогический университет, г. Челябинск, Россия.

ДонНТУ – Донецкий национальный технический университет, г. Донецк.

E-mail: smirnov@fizmet.dgtu.donetsk.ua

Статья поступила в редакцию 11.10.2012 г.