

## ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ ЛИСТОВЫХ СТАЛЕЙ В АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИИ

**И.В.Лейрих, А.Н.Смирнов (ДонНТУ, г. Донецк), К.Е.Писмарев (Алчевский металлургический комбинат, г. Алчевск)**

*Описаны современные тенденции в производстве тонкого листа для автомобилестроения, классификация сталей для его изготовления. Рассмотрены особенности получения и свойства сталей без атомов внедрения (IF)*

Мировая автомобилестроительная промышленность является динамично развивающейся отраслью и потребляет заметную часть производимого тонкого стального листа. Детали из такого листа изготавливают путем значительной холодной пластической деформации (штамповкой, глубокой вытяжкой) и они могут составлять до половины массы современного автомобиля. Основные требования к листовым сталям для вытяжки – обеспечение высокой степени деформируемости при изготовлении деталей сложной формы, высокое качество поверхности после деформации, которое необходимо для нанесения защитного покрытия. Метод глубокой вытяжки также широко применяют и при изготовлении других бытовых и промышленных изделий – холодильников, газовых плит, посуды и т.д. Как правило, прочность готового для таких изделий имеет меньшее значение по сравнению с высокой пластичностью исходного материала. Кроме того, высокая пластичность корпусных деталей препятствует хрупкому разрушению в случаях аварий, что также позволяет снизить массу автомобиля. Поэтому в качестве материала для изготовления тонкого листа в автомобильной промышленности и других машиностроительных производствах традиционно использовали низкоуглеродистые стали с содержанием углерода 0,05...0,08% (мас.), которые имеют относительно высокую пластичность и могут подвергаться значительной деформации без опасности разрушения и с минимальными энергозатратами.

Эволюция технологических представлений в части обеспечения высоких пластических кондиций для автолиста позволили ведущим мировым производителям создать ряд новых марок сталей со специфическим комплексом свойств. Крупнейшие мировые производители сталей для автомобилестроения Японии, США, Европы координируют работы в этом направлении, в том числе по вопросам стандартизации и терминологии. Основную координацию осуществляет Комитет по применению сталей в автомобильной промышленности (AUTOCO) Международного института

стали и чугуна (International Iron and Steel Institute). Для решения основной задачи – снижения массы автомобиля, был разработан комплекс программ, основными из которых являются «Программа создания сверхлегких, высокопрочных стальных корпусов» (ULSAB Ultra Light Steel Auto Body) и «Программа разработки общей концепции» (ULSAB AVC Advanced Vehicle Concepts).

В целом при изготовлении элементов кузова современного легкового автомобиля в среднем используется 220-250 кг сталей различных марок. По терминологии консорциума фирм, занимающихся созданием современных автомобилей со сверхлегким кузовом, современные стали для автомобилестроения разделяют на следующие основные группы:

- IS (*isotropic steels*) – изотропные стали, которые обладают одинаковыми механическими свойствами, независимо от направления прилагаемой нагрузки, что достигается легированием стали кремнием, марганцем, а также особыми режимами прокатки;
- BH (*bake-harden able steels*) – стали, упрочняемые сушкой покрытия, приобретающие высокую прочность в процессе сушки окончательного лакокрасочного покрытия ( $\sim 150^{\circ}\text{C}$ );
- TRIP (*transformation induced plasticity steels*) – стали, в которых мартенситное превращение идет во время пластической деформации с большими степенями, создавая значительный эффект упрочнения (например, при аварийном столкновении);
- DP (*dual phase steels*) – двухфазные стали, имеющие феррито-мартенситную или феррито-бейнитную структуру с высокой прочностью и штампуемостью;
- CP – стали со сложным фазовым составом;
- MILD – мягкие низкоуглеродистые стали;
- HSS Conventional (*high strength steels*) – обычные высокопрочные стали;
- HSLA (*high strength low alloy steels*) – высокопрочные низколегированные стали;
- AHSS – (*advanced*) усовершенствованные высокопрочные стали.

В соответствие с терминологией, принятой в программе ULSAB, к мягким относят стали с пределом текучести  $140\text{...}210\text{ Н/мм}^2$ , высокопрочными считают стали, имеющие предел текучести  $210\text{...}550\text{ Н/мм}^2$ , сверхвысокопрочными – стали с пределом текучести более  $550\text{ Н/мм}^2$ .

В отдельную группу выносят стали, которые подвергают значительной холодной пластической деформации в процессе изготовления изделия. Основной недостаток обычных низкоуглеродистых сталей – наличие эффекта текучести и склонность к деформационному старению. Это проявля-

ется в образовании при холодной деформации протяженных поверхностных дефектов – полос скольжения или линий Людерса-Чернова, появление которых связано с неоднородным течением металла при достижении напряжений предела текучести.

Причиной образования площадки текучести и деформационного старения является закрепление дислокаций атмосферами Котрелла, которые образуют атомы внедрения (interstitial), в первую очередь, углерод и азот. Известно, что сталь при комнатной температуре имеет объемно-центрированную кубическую решетку (ОЦК), а особенно сильно эффект закрепления дислокаций проявляется в ОЦК–металлах из-за несимметричности полей напряжений вокруг всех типов дислокаций в этой решетке и притяжения внедренных атомов к дислокациям с уменьшением энергии кристалла. При достижении значений напряжений предела текучести ( $\sigma_{Т.Н}$ ) дислокации отрываются от атмосфер, а образование большого числа легкоподвижных незакрепленных дислокаций приводит к появлению на поверхности множественных полос скольжения. В этих местах нанесенное покрытие легко отслаивается, а основной металл интенсивно корродирует.

Поскольку заметный вклад в деформационное старение стали вносит азот, для создания нестареющих низкоуглеродистых сталей используют легирование алюминием, который связывает азот в нитриды. Однако это не гарантирует полного устранения эффекта старения, поскольку для закрепления дислокаций достаточно  $(C+N) > 10^{-3}\%$  (мас.), а добавки алюминия ухудшают разливаемость стали, снижают пластичность и способность к глубокой вытяжке.

Другое принципиальное технологическое решение проблемы деформационного старения стали – удаление атомов внедрения из твердого раствора и создание сталей без или с весьма низким содержанием атомов внедрения – interstitial free (IF). Впервые такое решение проблемы было предложено более 25 лет назад японскими специалистами, и в настоящее время Япония является одним из основным производителем этих сталей. Как правило, технология производства IF сталей предполагает выплавку стали в конвертере и предусматривает обязательную отсечку шлака при сливе металла в ковш. При этом заливаемый в конвертер чугун подвергают глубокой десульфурации (содержание серы менее 0,0030 %). Перед выпуском плавки содержание углерода в стали составляет примерно 300 ppm, а кислорода – примерно 600 ppm. В зависимости от технологического маршрута температура стали на выпуске составляет 1650-1690 °С. Внепечная обработка стали в ковше обязательно сопровождается операцией выравнивания температуры и химического состава металла, а также операцией дегазации в агрегате RH-OB или VD/VOD. Содержание углерода в стали в конце вакуумирования составляет 0,20-0,25 ppm. Разливка стали на МНЛЗ осуществляется в режиме максимальной защиты стали от вторичного

окисления на всех участках движения металла от сталеразливочного ковша до кристаллизатора. Дополнительным фактором, способствующим повышению качества IF сталей является выбор рациональных огнеупоров для футеровки сталеразливочного и промежуточного ковшей, препятствующих загрязнению металла углеродом и кремнием.

Производство таких сталей освоено во всех странах, имеющих развитую металлургическую и автомобильную промышленности. В России IF-стали выпускают предприятия ОАО «Северсталь», ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». В Украине до настоящего времени стали класса IF не производились, что объясняется, прежде всего, отсутствием сталеплавильного цеха, который мог обеспечить соответствующую систему технологий выплавки, внепечной обработки и разливки стали. Наиболее вероятно, что в ближайшее время все необходимые технологические условия для производства сталей класса IF в Украине будут созданы на Алчевском металлургическом комбинате. В настоящее время на этом комбинате выполняется сооружение современного конвертерного цеха с двумя 300-тонными конвертерами с комбинированной продувкой. В структуре конвертерного цеха предусмотрен участок десульфурации чугуна в миксерах. Уже сегодня сталь, выплавляемая в 2-х двухванных сталеплавильных агрегатах вместимостью 2х300т, рафинируется на агрегате ковш-печь и вакууматоре VD/VOD и разливается на 2-х современных двухручьевых слабовых МНЛЗ.

Учитывая важную роль углерода в формировании механических и технологических свойств сталей, а также сложность удаления элементов внедрения из твердого раствора, металлургические предприятия выпускают ряд сталей с пониженным и нормируемым содержанием углерода. В общем случае такие стали обозначают следующим образом (указаны проценты по массе):

- LC – низкоуглеродистые 0,03...0,25 C, %;
- ELC – экстранизкоуглеродистые 0,005...0,02 C, %;
- ULC – ультранизкоуглеродистые 0,002...0,005 C, %;
- SULC – суперультранизкоуглеродистые C <0,002 %.

IF-стали выносят в отдельную группу, поскольку в них ограничено содержание углерода и азота. При этом они имеют специфическую систему легирования, которую выбирают для обеспечения основной цели – отсутствия эффекта старения при сохранении высокой штампуемости и достаточной прочности.

В целом, система легирования (тип легирующих элементов) большинства IF сталей практически одинакова. Содержание элементов внедрения (углерод + азот) составляет обычно не более 0,003 – 0,005 % (мас.). Содержание углерода более 0,005% следует считать уже относительно вы-

соким для IF стали. Современные IF–стали производства Японии и Южной Кореи преимущественно содержат 0,0011...0,002% С и 0,0025% N.

В табл.1 приведен химический состав типичных IF–сталей, серийно выплавляемых рядом зарубежных, в том числе российских, металлургических предприятий.

Таблица 1 – Химический состав IF–сталей, производимых металлургическими предприятиями

Изготовитель	C	Mn	P	S	Al	N <sub>2</sub>
Kawasaki Steel	≤0,002	0,18	0,006	0,007	0,028	0,002
National Steel	≤0,0025	0,20	0,006	0,007	0,028	0,002
Sollac	≤0,003	0,20	0,003	0,009	0,017	0,003
Северсталь	≤0,003	0,12	0,009	0,008	0,032	0,0054
ММК	≤0,003	0,15	0,009	0,008	0,018	0,007

Следует отметить, что при разработке первых марок IF сталей для упрочнения твердого раствора добавлялись различные элементы. Изучали стали, легированные кремнием и марганцем, а также были выполнены исследования по сталям с повышенным содержанием фосфора. Такие стали становятся склонными к охрупчиванию при вторичной обработке из-за недостаточной прочности границ зерен, что является особым недостатком стали без примесей внедрения. Охрупчивание и межзеренное растрескивание провоцируется присутствием элементов, ослабляющих границы зерен, в первую очередь фосфора и углерода, который выделяется в виде третичного цементита по границам зерен. Гарантированного устранения выделений третичного цементита, стабилизации структуры и упрочнения стали добиваются измельчением зерна и упрочнением твердого раствора. Для этого стали микролегируют сильными карбидообразующими элементами – титаном, ниобием, ниобием и титаном одновременно. Такие стали в литературе называют стабилизированными.

На практике необходимо учитывать значительный вклад титана и ниобия в упрочнение твердого раствора (феррита) при выделении дисперсных карбидов и нитридов. Дисперсионное упрочнение и зернограничное упрочнение за счет измельчения зерна и субзерна позволяет изменять прочность стали на ~ 50...60%. Следовательно, выбирая состав, режим деформационно–термической обработки и после деформационного охлаждения, можно добиться заметного упрочнения IF–стали и регулировать ее прочность в широких пределах.

Как показывает анализ, при производстве IF–сталей чаще используют легирование титаном. Предполагается, что содержание титана должно быть не меньше  $4 \cdot (C+N)$ . В противном случае в стали опять может появиться площадка текучести, и она станет склонной к деформационному

старению. В серийно выпускаемых сталях это соотношение ( $Ti/(C+N)$ ) составляет около 8–10 при содержании титана по массе 0,06...0,07%.

Ниобий более слабый карбидо- и нитридообразующий элемент по сравнению с титаном. Но карбиды и нитриды ниобия по размерам меньше, чем титана, а эффекты упрочнения и измельчения зерна обратно пропорциональны размерам выделяющихся частиц. Рекомендуют легировать сталь ниобием при относительно высоком содержании углерода (~0,006 %), что позволяет повысить сопротивление охрупчиванию стали.

Имеются также данные по совместному легированию этими элементами, поскольку они в различной степени взаимодействуют с углеродом, азотом и серой, образующиеся карбиды и нитриды отличаются температурой растворения и растворимостью в феррите и аустените, выделения карбидов этих элементов могут иметь различную морфологию, что влияет на общий уровень свойств стали. В целом, при комплексном легировании свойства листовых сталей, в том числе штампуемость, получается выше. При совместном легировании содержание титана составляет 0,02...0,04 %, а ниобия – 0,03...0,05 %

Учитывая различный уровень свойств, производители обычно указывают тип элемента в обозначении стали (Ti-IF, Nb-IF или Ti-Nb-IF). Необходимо отметить, что производители не указывают марки IF-сталей, а приводят только состав. Единой международной системы обозначений для IF-сталей в настоящее время нет.

В рамках программы ULSAB принята система классификации, которая связывает тип стали, минимальный предел текучести ( $\sigma_T$  в Н/мм<sup>2</sup>) и временное сопротивление ( $\sigma_B$  в Н/мм<sup>2</sup>). Общая схема маркировки – XXX  $\sigma_T/\sigma_B$ , где XXX – тип стали (см. выше). Например, марка ВН 260/370 соответствует стали, упрочняемой при сушке лакокрасочного покрытия с  $\sigma_T=260$  Н/мм<sup>2</sup> и  $\sigma_B=370$  Н/мм<sup>2</sup>, марка стали без атомов внедрения – IF 300/420.

В Японии принята несколько отличающаяся система маркировки IF-сталей. Стандартом JFS A3011: 1998 для листовых сталей, которые проходят глубокую вытяжку и гальваническое нанесение покрытия, в качестве основного показателя выбрано временное сопротивление. Эти стали маркируют следующим образом: JACXXX\*, где XXX –  $\sigma_B$  в Н/мм<sup>2</sup>, \* – буква, показывающая уровень остальных свойств. Примеры маркировки приведены в табл.2.

Необходимо учитывать, что для листовых сталей указанные механические свойства ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_T$ ,  $\delta$ ) не полностью характеризуют способность к глубокой вытяжке. В качестве характеристики способности листового материала к значительной пластической деформации обычно используют коэффициент (показатель) плоскостной анизотропии  $r$ , который также назы-

вают коэффициентом Лэнкфорда (Lankford).

Таблица 2 – Примеры маркировки IF-сталей по стандарту JFS A3011: 1998 (для толщины листа 0,8...1,0 мм)

$\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup>	Марка	$\sigma_T$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\delta$ , %
260	JAC260G	100...175	46...54
270	JAC270C	175...295	36...45
	JAC270D	125...215	41...50
	JAC270E	120...195	43...51
	JAC270F	110...175	45...53

Его определяют как отношение истинных значений деформаций по толщине и ширине листа:

$$r = \frac{\ln(b_1 / b_0)}{\ln(d_1 / d_0)} \quad (1)$$

Чем больше значение  $r$ , тем качественнее штамповка. Поэтому, разрабатывая состав и технологию получения стали для глубокой вытяжки, стремятся добиться максимальных значений  $r$ . Определение коэффициента плоскостной анизотропии ( $r$ -value) предусмотрено, например, стандартом Японии «Japanese Industrial Standards JIS Z2254, 1996: Method of determining the plastic strain ratio for metallic sheet and strip». В указанном стандарте предусмотрено определение этого коэффициента при предварительной деформации на 15 % в долевом ( $r_0$ ), под углом 45 ° ( $r_{45}$ ) и 90 ° ( $r_{90}$ ) к направлению прокатки листа.

Для обычной углеродистой листовой стали значение  $r$  составляет менее 1,2. Для IF-сталей значение показателя  $r$  изменяется в широких пределах в зависимости от конкретных условий производства, обычно  $r$  составляет не менее 1,4 и может достигать 3,0 и более.

Таким образом, при реализации программ по созданию передовых автомобилей со сверхлегким стальным кузовом автомобилестроители расширяют спектр требований к механическим свойствам и качеству стального листа. По сравнению с традиционными сталями новейшие материалы характеризуются оптимальным сочетанием высокой прочности и хорошей формовости. Развитие их производства сдерживается сложной технологией производства, необходимостью значительной модернизации оборудования и строгого соблюдения технологических параметров процессов выплавки, внепечной обработки и непрерывной разливки.

© Лейрих И.В., Смирнов А.Н.,  
Писмарев К.Е. 2007