

к.т.н. Кузнецов Д. Ю.

(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина, MChM-DonGTU@yandex.ru)

## ЭВОЛЮЦИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И КАЧЕСТВА АВТОМОБИЛЬНОГО ЛИСТА ИЗ МАЛОКРЕМНИСТЫХ СТАЛЕЙ

*Выполнен анализ тенденций развития и совершенствования современной концепции производства малокремнистых автолистовой стали в направлении обеспечения высокой штампуемости проката и его способности к глубокой вытяжке, сверхвысокой прочности стали, а также повышения коррозионной стойкости автомобильного листа как путем освоения производства сталей с покрытиями разного класса, так и за счет оптимизации химического состава и технологии производства самих малокремнистых автолистовых сталей.*

**Ключевые слова:** малокремнистая сталь, автомобильный лист, глубокая вытяжка, коррозионная стойкость, качество, кремний.

Химический состав тонколистовой стали для холодной штамповки традиционно регламентируется не только стандартами (ГОСТ в СНГ, DIN в Германии, ASTM в США, BS в Великобритании, JIS в Японии и т.д.), но и стандартами на продукцию данного назначения, согласно которым химический состав выбирается по усмотрению изготовителя или требованию потребителя. В некоторых странах (Австрия, Италия) изготовление и поставка малокремнистой автолистовой стали производится по техническим условиям [1].

Внедрение современных технологий производства сталей для автомобилестроения является необходимым условием обеспечения конкурентоспособности отечественных конструкционных сталей. Такие технологии должны разрабатываться с учетом мировых тенденций развития данного класса материалов, но при этом следует искать собственные пути решения задач, возникающих у отечественных потребителей автомобилестроительных сталей, учитывать особенности оборудования украинских металлургических предприятий.

Одно из основных направлений развития материалов для кузова и других деталей автомобиля – увеличение объема применения высокопрочных сталей с целью повышения безопасности и снижения массы автомобиля. Необходимость снижения массы диктуется постоянным ужесточением экологических требований по умень-

шению вредных веществ в выхлопе автомобиля [2].

В настоящее время крупнейшие металлургические компании, производящие малокремнистую автолистовую сталь, совместно с основными украинскими производителями автомобилей работают над созданием сталей с улучшенными потребительскими свойствами.

Снижение производственных затрат и возрастающие требования топливной экономичности, безопасности и увеличения сроков эксплуатации автомобилей являются основными задачами сегодняшнего дня, решение которых лежит в плоскости повышения конструктивной прочности, износостойкости, коррозионной стойкости узлов и кузова автомобиля при уменьшении его массы.

Применение вакууматоров, позволяющих получать стали со сверхнизким содержанием углерода, в конвертерном производстве основных металлургических предприятий, производящих автолистовые стали (ОАО «НЛМК», ОАО «ММК», ОАО «Северсталь», ПАО «АМК»), открывает новые возможности для производства как высокоштампуемых сверхнизкоуглеродистых сталей, так и сталей повышенной прочности различных классов в холоднокатаном и покрытом вариантах, а также холоднокатаных сталей повышенной коррозионной стойкости [3].

Говоря о первом направлении работ, касающемся обеспечения высокой штампуемости, можно отметить, что сегодня на украинских и российских металлургических комбинатах практически освоено производство высокоштампуемого автолистового проката из стали типа IF в холоднокатаном состоянии и с цинковым покрытием [2]. Типовой химический состав выпускаемой в настоящее время стали IF, используемой для производства холоднокатаного листа и листа с покрытиями, представлен в табл. 1.

Вопрос выбора сверхвысокопрочной марки стали является наиболее важным, поскольку в этом случае на первое место выходит способность стали пластически деформироваться в процессе изготовления деталей автомобиля.

Достижение требуемых механических свойств и коррозионной стойкости сталей зависит от их прецизионно выверенного химического состава, технологии производства и технологии изготовления конкретной детали корпуса автомобиля. Структура и фазовый состав большинства марок малокремнистых автолистовых сталей оптимизируются при помощи контролируемой прокатки и термообработки.

Одним из основных ограничений химического состава малокремнистых автолистовых сталей является регламентируемое содержание кремния. Присутствие в низкоуглеродистой стали, применяемой для глубокой и особо сложной вытяжки, минимального содержания кремния (на уровне следов) является неизменным требованием технологов-прокатчиков при производстве изделий для кузовов автомобилей, поскольку кремний повышает предел текучести и предел прочности, но вместе с тем снижает относительное удлинение стали. Необходимо выделить три группы

марок малокремнистых автолистовых сталей, производимых на отечественных предприятиях в заметных масштабах.

**Стали, легированные фосфором (Phosphor-alloyed (P) steels).** Добавки фосфора повышают прочность и стойкость низколегированных низкоуглеродистых конструкционных сталей к атмосферной коррозии.

**Стали, упрочняемые сушкой лакокрасочного покрытия (Bake-hardenable (BH) steels).** Преимуществом ВН-сталей является то, что упрочняемость достигается в едином технологическом цикле сушки лакокрасочного покрытия. Мелкозернистая структура, обеспечиваемая легированием алюминием и др. элементами, а также пониженное содержание вредных примесей, увеличивает количество углерода на границе зерна и тем самым существенно поднимает верхний предел упрочняемости ВН-сталей.

**Стали без фаз внедрения (Interstitial Free (IF) steels).** Высокопластичные IF-стали, структура которых стабилизирована микродобавками титана или/и ниобия, содержат сверхнизкое количество углерода (<0,005%), который совместно с азотом полностью связан в карбиды, нитриды и карбонитриды. Прочность обусловлена упрочнением твердого раствора кремнием, марганцем и фосфором.

Низкие величины отношения  $\sigma_T/\sigma_B$  и высокая степень деформационного упрочнения этих сталей гарантируют высокие прочностные свойства и однородность толщины штампованных деталей. Использование IF-сталей вместо низкоуглеродистых сталей (типа 08Ю) обеспечивает (при сохранении прочности) снижение массы пропорциональное глубине вытяжки/штамповки [4].

Таблица 1 – Типовой химический состав стали типа IF

Значение	Содержание основных элементов, %						
	C	Si	Mn	S	P	Al	N
min	0,002	0,010	0,10	0,005	0,003	0,015	0,002
max	0,005	0,050	0,20	0,010	0,015	0,06	0,007

Типичный химический состав IF-стали с добавками ниобия и титана следующий: 0,002% С, 0,01% Si, 0,15% Mn, 0,01% P, 0,01% S, 0,0025% N, 0,04% Al, 0,016% Nb, 0,025% Ti. Добавочное микролегирование фосфором, марганцем и бором повышает прочностные характеристики IF-сталей. Так, сталь IF 260 содержит 0,003% С, 0,01% Si, 1,2% Mn, 0,05% P, 0,01% S, 0,0025% N, 0,04% Al, 0,0015% В, 0,05% Ti.

В начале 90-х годов прошлого века перспектива распространения на автомобильном рынке новых композиционных материалов заставила ведущих производителей стали объединить усилия по разработке новых материалов. Интеграция крупнейших мировых производителей сталей для автомобилестроения: JFE Steel Corporation (Япония), Thyssen Krupp Stahl AG (ФРГ), SAAB (Швеция), United States Steel Corporation (США) и др. – осуществляется в рамках различных инициативных программ, координируемых Комитетом по применению сталей в автомобильной промышленности (AUTO-CO) Международного института чугуна и стали (International Iron and Steel Institute, IISI) [5].

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) [2].

Консорциум USLAB AVC заметно изменил концепцию классификации малокремнистых автолистовых сталей и конкретизировал их применение для изготовления тех или иных конструкций. В обозначениях присутствуют буквенные обозначения сталей, величины минимальных значений их пределов текучести и прочности в МПа (например, DP 300/500). К классу «рядовые высокопрочные стали» (conventional HSS) теперь отнесены Mild-, IF-, IS-, BH-, CMn- (марганцовистые) и HSLA- (высокопрочные низколегированные) стали, а к классу «усовершенствованные высокопрочные стали» (Advanced High Strength (AHSS) Steels) — DP-, CP-, TRIP- и Mart-стали. Механические свойства вышеперечисленных сталей иллюстрируются диаграммой на рис. 1 [5].

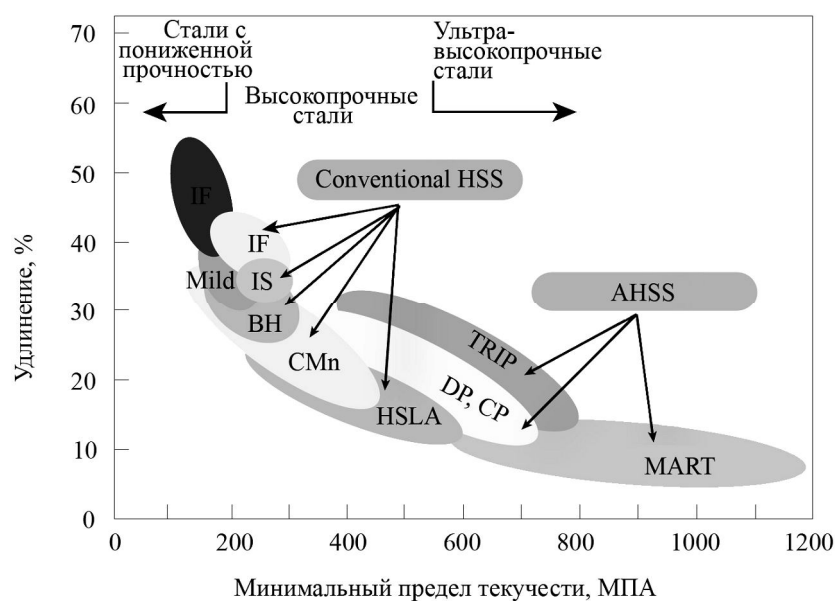


Рисунок 1 – Классификация малокремнистых автолистовых сталей USLAB AVC

IF-стали могут проявлять относительно низкую ударную вязкость после формования или глубокой вытяжки. Тем не менее, концерн JFE декларировал, что применение уникальных технологий, позволяющих сочетать повышение прочностных характеристик за счет зернограницного рафинирования с дополнительным твердодисперсным упрочнением, предопределило создание высокопрочных ( $\sigma_b = 450$  МПа) мелкозернистых (7-8 микрон) IF-сталей, в которых содержание углерода приблизительно в 2 раза выше, чем в обычных IF-сталях.

Пожалуй, одной из наиболее важных задач в автомобилестроении на сегодняшний день является повышение коррозионной стойкости автомобиля. О том, как эта задача решается путем использования малокремнистых автолистовых сталей с покрытиями (Zn, Al-Si), сказано достаточно много [1, 6, 7]. Имеет смысл остановиться на путях повышения коррозионной стойкости самих малокремнистых автолистовых сталей путем оптимизации их химического состава и технологии производства.

До недавнего времени считалось, что, во-первых, коррозионная стойкость малокремнистых автолистовых низкоуглеродистых и низколегированных сталей различается незначительно, и во-вторых, невозможно существенно повлиять на нее, изменяя химический состав стали, чистоту по неметаллическим включениям, технологи-

ческие параметры производства. Поэтому единственным направлением борьбы с коррозией было принято считать нанесение защитных покрытий – использование оцинкованных сталей, повышение качества лакокрасочного покрытия и т.д.

В то же время, принимая во внимание мнение представителей автомобильных заводов, а также анализируя опыт эксплуатации различных отечественных и зарубежных автомобилей [5], можно сделать вывод о различной коррозионной стойкости самих автолистовых сталей в зависимости от марки, завода-производителя и технологических параметров производства.

Для проведения предварительных коррозионных испытаний сталей разных марок и разных заводов применяют метод переменного погружения образцов в водный раствор 3,5% NaCl, в соответствии со стандартом ASTM G 44-75. Коррозионную стойкость оценивают по приросту массы образца (привесу) на единицу площади его поверхности. По результатам таких испытаний получена зависимость скорости коррозии от суммарного содержания углерода и кремния [8]. Как показано на рис. 2, средние значения скорости потери массы в результате атмосферной коррозии для сверхнизкоуглеродистых сталей примерно в 2-3 раза ниже, чем для обычных низкоуглеродистых сталей.

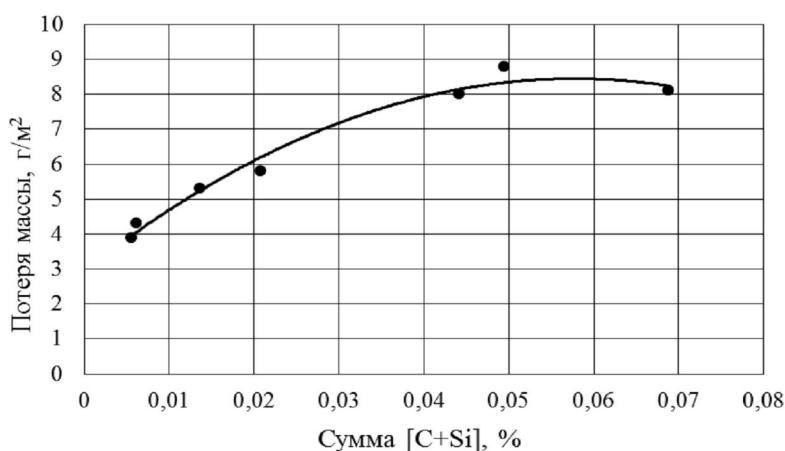


Рисунок 2 – Зависимость потери массы малокремнистой автолистовой стали от суммы содержания [C+Si]

Учитывая положительное влияние на коррозионную стойкость пониженного содержания углерода и кремния, освоение производства сталей типа IF и других сталей с низким содержанием углерода следует проводить, оценивая влияние содержания всех легирующих элементов на коррозию, и оптимизировать состав стали с точки зрения обеспечения наиболее высокой коррозионной стойкости. Именно на базе таких сталей можно обеспечить не только высокую штампуемость, но и коррозионную стойкость производимого автолиста.

Если говорить о ближайшей перспективе, то сейчас, например, активно разрабатываются высокопрочные ( $\sigma_T > 600$  МПа) аустенитные стали (Twining Induced Plasticity (TWIP) steels), которые обладают очень высокими пластическими свойствами (полное удлинение более 80%). Уникальные свойства этих высокомарганцовистых сталей (содержание Mn до 30%), содержащих до 9% алюминия, обеспечиваются двойникованием кристаллической решетки. Низкая энергия дефектов упаковки (деформационных двойников) в сочетании с упрочняющим деформационным мартенситным превращением позволяют эффективно упрочнять эти стали при гидропрессовании.

Наноструктурированная сталь NANO Hiten (разработка JFE Steel) с высоким пределом текучести (780 МПа), обладая однофазной ферритной структурой, со-

держит в своей структуре термически стабильную упрочняющую дисперсную фазу с размером частиц из трехкомпонентных карбидов в несколько нанометров. Подобная микроструктура обеспечивает высокую величину относительного удлинения (до 25%). Это первый в мире образец промышленной стали с дисперсной фазой в несколько нанометров. Данная сталь не содержит кремния, поэтому хорошо поддается горячему оцинкованию и уже используется для изготовления шасси и рамы автомобилей [9].

Таким образом, в настоящее время на мировом и внутреннем рынках растет доля листового проката из мало- и особонизкоуглеродистых сталей со специальными свойствами, причем требования к его качеству постоянно ужесточаются.

Среди наиболее важных направлений улучшения потребительских свойств автолистовой стали можно отметить следующие:

- высокоштампуемый прокат из сверхнизкоуглеродистой стали;
- стали повышенной прочности;
- повышение коррозионной стойкости автомобильного листа путем освоения производства сталей с цинковым, железоцинковым и алюмокремниевым покрытиями разного класса прочности и назначения, а также за счет оптимизации химического состава и технологии производства самих малокремнистых автолистовых сталей.

### Библиографический список

1. Гольдштейн М.И. Специальные стали / М.И. Гольдштейн, С.В. Грачев, Ю.Г. Векслер. – М.: МИСиС, 1999. – 408 с.
2. Лейрих И.В. Тенденции развития и применения листовых сталей в автомобилестроении / И.В. Лейрих, А.Н. Смирнов, К.Е. Писмарев // Наукові праці ДонНТУ. Серія: Металургія. – Донецьк: ДонНТУ, 2007. – С. 12–19.
3. Шахпазов Е.Х. Прогресс в технологии производства автолистовых сталей / Е.Х. Шахпазов, А.И. Зайцев, И.Г. Родионова // Металлург. – 2007. – №5. – С. 51–54.
4. Степанов А.А. Комплексное освоение технологии производства автолистовых IF-сталей в конвертерном производстве ОАО "Северсталь" / А.А. Степанов, С.Д. Зинченко, А.М. Ламухин // Черная металлургия: Бюл. НТИ. – 2005. – №1. – С. 39–42.
5. Титов В. Стальной прокат для автомобильной промышленности за рубежом / В. Титов // Национальная металлургия. – 2004. – № 5. – С. 84–89.
6. Поживанов М.А. Выплавка стали для автолиста / М.А. Поживанов, Е.Х. Шахпазов, А.Г. Свяжгин. – М.: Интерконтакт-Наука, 2006. – 165 с.

7. Хеллер Т. Тенденции развития стальной полосы с покрытием / Т. Хеллер, Т. Эвертц, А. Пихлер // *Черные металлы*. – 2006. – № 12. – С. 56-62.

8. Родионова И. Технологические аспекты производства сталей для автомобилестроения / И. Родионова, Г. Филиппов // *Национальная металлургия*. – 2004. – № 2. – С. 93-97.

9. Ma Fang. Опыт обеспечения состава автолистовых IF-сталей / Ma Fang, Song Mantang, Wan Huizhong // *Металлург*. – 2009. – № 3. – С. 40-42.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф. Новохатским А. М.*

*Статья поступила в редакцию 01.11.13.*

**к.т.н. Кузнецов Д. Ю.** (ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)

### **ЕВОЛЮЦІЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ І ЯКОСТІ АВТОМОБІЛЬНОГО ЛИСТА З МАЛОКРЕМЕНИСТИХ СТАЛЕЙ**

*Виконаний аналіз тенденцій розвитку і вдосконалення сучасної концепції виробництва мало-кременистих автолистових сталей у напрямі забезпечення високої штампувальності прокату і його здатності до глибокого витягу, надвисокої міцності сталі, а також підвищення корозійної стійкості автомобільного листа як шляхом освоєння виробництва сталей з покриттями різного класу, так і за рахунок оптимізації хімічного складу і технології виробництва самих мало-кременистих автолистових сталей.*

**Ключові слова:** *малокремениста сталь, автомобільний лист, глибокий витяг, корозійна стійкість, якість, кремній.*

**Kuznetsov D. Yu.** (DonSTU, Alchevsk, Ukraine)

### **EVOLUTION OF PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES AND QUALITY OF AUTOMOBILE-BODY SHEET FROM LOW-SILICON STEELS**

*The analysis of modern conception progress and perfection of low-silicon steels for automobile-body sheet production trends is executed in the direction of providing high stamping rolled metal and his capacity for deep extraction, ultrahigh durability of steel, and also increases of automobile-body sheet inoxidizability both by mastering of steels production with coverages of different class and due to optimization of chemical composition and technology of production low-silicon steels for automobile-body sheet.*

**Key words:** *low-silicon steel, automobile-body sheet, deep extraction, inoxidizability, quality, silicon.*