



В. Титов, к.т.н., Научно-технический центр компании «Глобус-Сталь»

СТАЛЬНОЙ ПРОКАТ ДЛЯ АВТОМОБИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ЗА РУБЕЖОМ

Снижение производственных затрат и возрастающие требования топливной экономичности, безопасности и увеличения сроков эксплуатации автомобилей — решение этих проблем лежит в плоскости повышения конструктивной прочности, износостойкости, коррозионной стойкости различных узлов и кузова автомобиля при уменьшении его массы



Снижение производственных затрат и возрастающие требования топливной экономичности, безопасности и увеличения сроков эксплуатации автомобилей — решение этих проблем лежит в плоскости повышения конструктивной прочности, износостойкости, коррозионной стойкости различных узлов и кузова автомобиля при уменьшении его массы.

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), SSAB (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). Целью данных программ является создание сверхлегких, экономичных, безопасных для человека и окружающей среды автомобилей. Машины, разработанные на основе новых конструкторских решений и новых высокопрочных сталей, должны стать максимально комфортными, легкими в управлении, но без повышения базовой стоимости. Комитет координирует усилия более чем 30 ведущих мировых производителей металлопроката по систематизации перспективных сталей, разработке новых и внедрению уже существующих марок сталей в автомобильную промышленность. Кроме того, разрабатываются нормативные документы по применению высокопрочных сталей и новых технологических процессов их обработки применительно к автомобилестроению.

Основные направления координационных программ проводимых под эгидой AUTO-CO IISI схематично представлены на диаграмме.

Для устранения возможной путаницы в определениях и стандартах различных стран в рамках USLAB были введены собственные категории прочности, определяемые величиной предела текучести (см. таблицу) для автопроката толщиной 0,65–2,0 мм.

Программа USLAB определяла, что корпус автомобиля должен на 90% состоять из высокопрочных и сверхвысокопрочных сталей. Наиболее подходящая категория стали (по данной классификации) и соответствующая ей конкретная марка для каждого конструкционного элемента автомобиля должна подбираться экспертами поставщиков. 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. Ниже приведены краткие характеристики и перечислены некоторые особенности механических свойств, структурного и фазового составов высоко- и сверхвысокопрочных сталей, регламентированных поочередно консорциумами USLAB и USLAB-AVC.

Категории прочности по программе USLAB

Предел текучести, МПа	Категории USLAB	Примечания
≥ 140	Низкоуглеродистые мягкие стали (mild steels)	На сегодняшний день наиболее часто используются в современном автомобилестроении, поскольку легко подвергаются процессам формования, штамповки, вырубки и т.п.
≥ 210	Высокопрочные стали (high strength steels)	В концепции USLAB занимают до 80%
≥ 550	Сверхвысокопрочные стали (ultra high strength steels)	Для изготовления внешних конструктивных элементов, которые могут подвергаться ударному воздействию при столкновении. В основном для поперечных элементов нижней части корпуса



Программа создания сверхлегких, высокопрочных стальных корпусов (Ultralight steel Auto Body, ULSAB)



Программа создания ультралегких стальных дверей и капотов (Ultralight Steel Auto Closure, ULSAC)



Программа создания ультралегких стальных систем подвески (Ultralight Steel Auto Suspensions, ULSAS)

Прогнозируемые результаты

ULSAB

- Снижение веса корпуса на 25% по сравнению с базовыми моделями того или иного класса, без увеличения его стоимости
- Увеличение прочности на кручение на 80%
- Увеличение прочности на изгиб на 52%
- Соответствие всем «краш»-нормам

ULSAC

- Снижение веса на 42% по сравнению с базовыми моделями того или иного класса, без увеличения стоимости
- Снижение веса дверей на 22% по сравнению с лучшими в своем классе дверями с ребрами жесткости

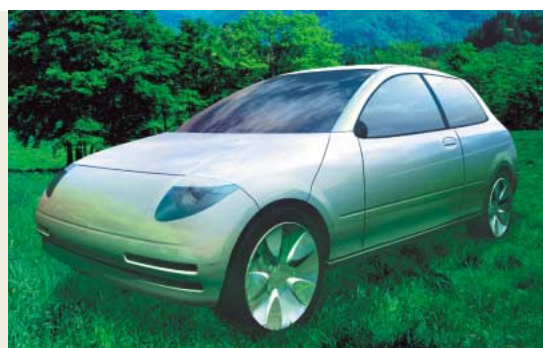
ULSAS

- Снижение веса на 34% по сравнению с существующими конструкциями
- Приближение к весу систем на основе сплавов алюминия при снижении стоимости на 30%

ULSAB-AVC

Программа разработки общей концепции (Advanced Vehicle Concepts, ULSAB-AVC) является логичным продолжением и развитием программ ULSAB и самой последней инициативы IISI, направленной, в частности, на создание новых сталей и технологий их изготовления, а также разработку новых дизайнерских решений для автомобилей С-класса, отвечающих т.н. критериям SAFE (Safe, Affordable, Fuel efficient, Environmentally friendly)

- Безопасность (Safe): соответствие самым высоким требованиям безопасности
- Приемлемая стоимость (Affordable): себестоимость для автомобилей класса С должна составлять 9200 – 10200 долл.
- Топливная экономичность (Fuel Efficient): расход топлива для машин класса С должен составить 3,2– 4,5 литра на 100 км
- Экологичность (Environmentally friendly): применение сталей с гарантированной возможностью полной вторичной переработки и снижение до минимума вредных выхлопов



Конечно, в рамках статьи невозможно провести детальное рассмотрение всех металлургических и материаловедческих проблем, связанных с производством TRIP, DP, BH и другого проката. Некоторые аспекты данных вопросов были достаточно подробно изложены в «НМ» №2, с. 93–97. Отметим только, что 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 автосталей оптимизируются при помощи контролируемой прокатки и термообработки.

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

Изотропные стали (isotropic (IS) steels). IS-стали обладают одинаковыми прочностными и прочими характеристиками независимо от направления приложенной нагрузки. Прецизионное легирование упрочняющими элементами (марганец, кремний и др.) в совокупности с контролируемым процессом прокатки обеспечивают изотропность структуры IS-сталей.

Стали, упрочняемые сухой лакокрасочного покрытия (Bake-harden-

able (BH) steels). Преимуществом BH-сталей является то, что упрочняемость достигается в едином технологическом цикле сушки лакокрасочного покрытия. Упрочнение происходит в два этапа. Высокопрочный прокат листовой стали, обладая исходной высокой пластичностью и низким значением предела текучести (сравнимыми с аналогичными показателями для низкоуглеродистых мягких сталей), приобретает высокую прочность при холодном прессовании с последующим дополнительным упрочнением (повышение пределов текучести и прочности) после сушки лакокрасочного покрытия при температуре >150 °С. При разрыве дислокаций в процессе пресс-

сования (растяжения) происходит перераспределение междоузельных атомов растворенного углерода в матричной фазе с последующим их закреплением, вследствие сушки, на этих дефектах кристаллического строения. 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.

Упрочняемость проката зависит от количества растворенного углерода, колебания содержания которого влияют на стабильность прочностных свойств. Прецизионное легирование ниобием и/или титаном с последующим высокотемпературным отжигом (после прокатки) обеспечивают необходимое выделение растворенного углерода из карбидов этих металлов, а также стабильность упрочняемости ВН-сталей.

На упрочняемость ВН-сталей, содержащих титан, значительное влияние оказывает уровень содержания серы. Если ее содержание высокое, то наряду с TiC будет преимущественно выделяться фаза Ti₄C₂S₂, растворить которую при температурах растворения карбида титана не удастся. Отсюда следует, что чем меньше серы в ВН-стали, тем больше в ней количество растворенного углерода и тем выше, соответственно, будет ее упрочняемость. Марганец, в свою очередь, может нивелировать повышенное содержание серы вследствие образования MnS.

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

Низкие величины отношения σ_T/σ_B и высокая степень деформационного упрочнения этих сталей гарантируют высокие прочностные свойства и однородность толщины штампованных деталей кузова. Использование IF-сталей вместо рядовых низкоуглеродистых сталей (типа 08Ю) обеспечивает, при сохранении прочности снижение массы пропорциональное глубине вытяжки/штамповки.

Типичный химический состав IF-стали следующий: 0,002 %C, 0,01 %Si, 0,15 %Mn, 0,01 %P, 0,01 %S, 0,0025

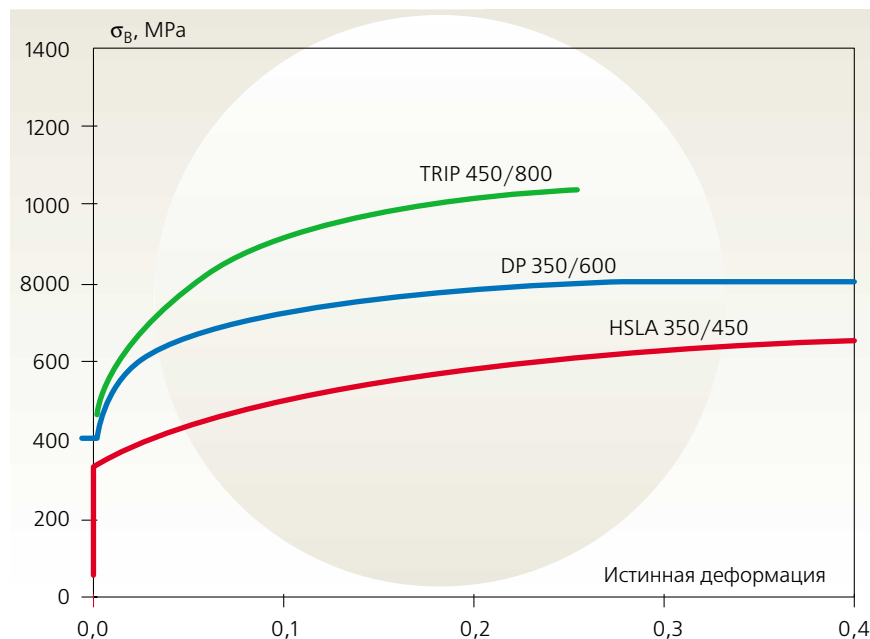


Рис. 1. Поведение HSLA-, DP- и TRIP-сталей в координатах нагрузка-деформация

%N, 0,04 %Al, 0,016 %Nb, 0,025 %Ti. Добавочное микролегирование фосфором, кремнием, марганцем и бором повышает прочностные характеристики IF-сталей. Сталь IF 260 содержит 0,003 %C, 0,01 %Si, 1,2 %Mn, 0,05 %P, 0,01 %S, 0,0025 %N, 0,04 %Al, 0,0015 %B, 0,05 %Ti.

Двухфазные стали (Dual Phase (DP) steels). Ферритно-мартенситная (или ферритно-бейнитная) структура обеспечивает высокие прочностные свойства DP-сталей (σ_T составляет 350–600 МПа). «Мягкий» феррит (до 80%) придает пластические свойства DP-сталей в их исходном состоянии (поставки). В процессе штамповки деформационные напряжения концентрируются в ферритной фазе, приводя к высокой степени деформационного упрочнения. Высокая степень деформационного упрочнения в сочетании с высоким относительным удлинением гарантируют DP-сталей очень высокий предел прочности. DP-стали по сравнению с конструкционными низколегированными высокопрочными сталями (HSLA steels), имеющими аналогичное значение предела текучести, демонстрируют более высокую скорость начального деформационного упрочнения, более высокое относительное удлинение и предел прочности, а также меньшее отношение σ_T/σ_B . Величина предела прочности DP-сталей достигает 1000 МПа (DP 700/1000).

В DP-сталях углерод (обычно $>0,1\%$) обеспечивает формирование мартенситной фазы и наряду со сбалансированными микродобавками Mn, Cr, Mo, V и Ni отвечает за ее прочностные свойства.

ТРИП-стали (Transformation Induced Plasticity (TRIP) steels). Микроструктура

ра TRIP-сталей представляет собой ферритную матрицу с дисперсно-распределенными включениями прочной мартенситной и/или бейнитной фазы. Обязательным условием осуществления феномена высокой пластичности является наличие остаточного аустенита ($\geq 5\%$), который постепенно претерпевает мартенситное превращение при растяжении листа, все более увеличивая степень деформационного упрочнения при уменьшении толщины листа в процессе формования. Параллельно, аналогично DP-сталям, происходят другие процессы упрочнения. Стальной TRIP-прокат демонстрирует очень высокую прочность, пластичность и высокое однородное удлинение.

Содержание углерода, кремния и/или алюминия в TRIP-сталях повышено по сравнению с DP-сталями, однако для обеспечения свариваемости содержание углерода в TRIP-сталях не должно превышать 0,2%. При минимально допустимых концентрациях углерода остаточный аустенит трансформируется в мартенсит уже на начальных стадиях деформации. При повышенном содержании углерода остаточный аустенит более стабилен и мартенситное превращение происходит только при штамповке или формовании вследствие высокой степени деформации (удлинения). Более того, остаточный аустенит в этом случае содержится в структуре уже готового изделия, и дополнительное мартенситное превращение (упрочнение) происходит даже в результате столкновения автомобиля.

Типичный химсостав TRIP-сталей включает: для легированных кремнием TRIP-сталей 700/800 – 0,2 %C, 1,5 %Mn, 1,5 %Si; для легированных

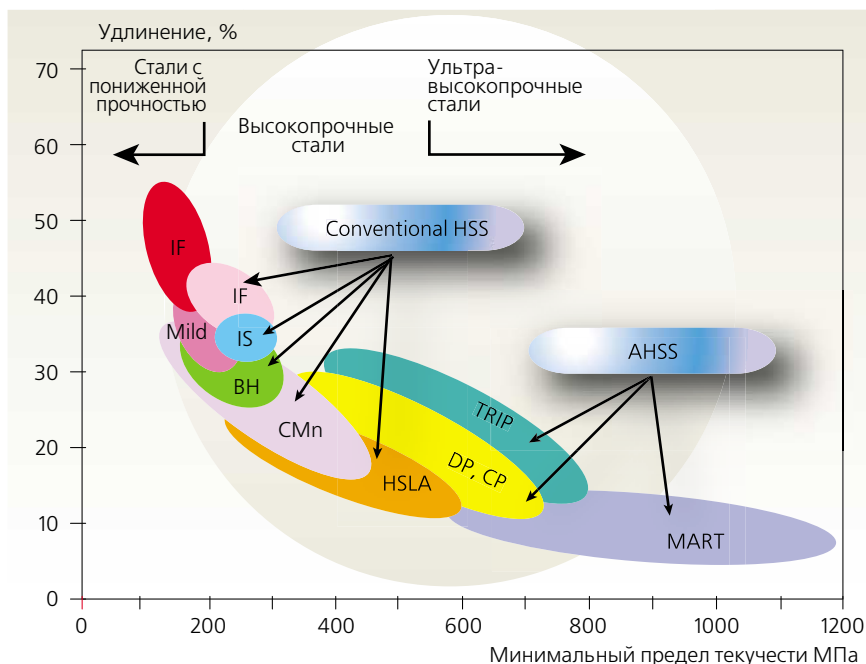


Рис. 2. Классификация автосталей

алюминием TRIP-сталей 600 – 0,2 %C, 1,5 %Mn and 2,0 %Al.

В качестве примера на диаграмме «нагрузка-деформация» схематически иллюстрируется поведение HSLA-, DP- и TRIP-сталей, обладающих сравнимыми величинами предела текучести. Степень упрочнения DP- и TRIP-сталей гораздо выше, чем у низколегированных HSLA-сталей, что обеспечивает им несомненные преимущества применительно к процессам штамповки и формования.

Стали с комплексной фазовой структурой (**Complex Phase (CP) steels**).

CP-стаи имеют очень тонкую ферритную структуру с большим процентным объемом твердофазных фракций. Обычно состав легирующих компонентов отличается от состава DP- и TRIP-сталей тем, что производится дополнительное легирование ниобием, титаном и/или ванадием, которые формируют различные тонкодисперсные упрочняющие фазовые включения. CP-стаи обладают высоким значением предела текучести (обычно более 800 МПа), а также способностью демпфировать ударные воздействия в упругой области и при малых деформациях.

Мартенситные стали (Martensitic (Mart) steels).

Мартенситные стали обеспечивают максимальную величину предела прочности (до 1500 МПа). Эти стали подвергают закалке с последующим отпуском для повышения пластичности и обеспечения высокой формовости при очень высоких величинах деформации. Известно, что повышение содержания углерода пропорционально величине предела прочности для закаленной мартенситной стали. Дополнительное повышение прочностных характеристик достигается сбалансированным легированием марганцем, хромом, ванадием, молибденом и другими элементами.

Консорциум USLAB-AVC заметно изменил концепцию классификации автосталей USLAB 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 высоко-

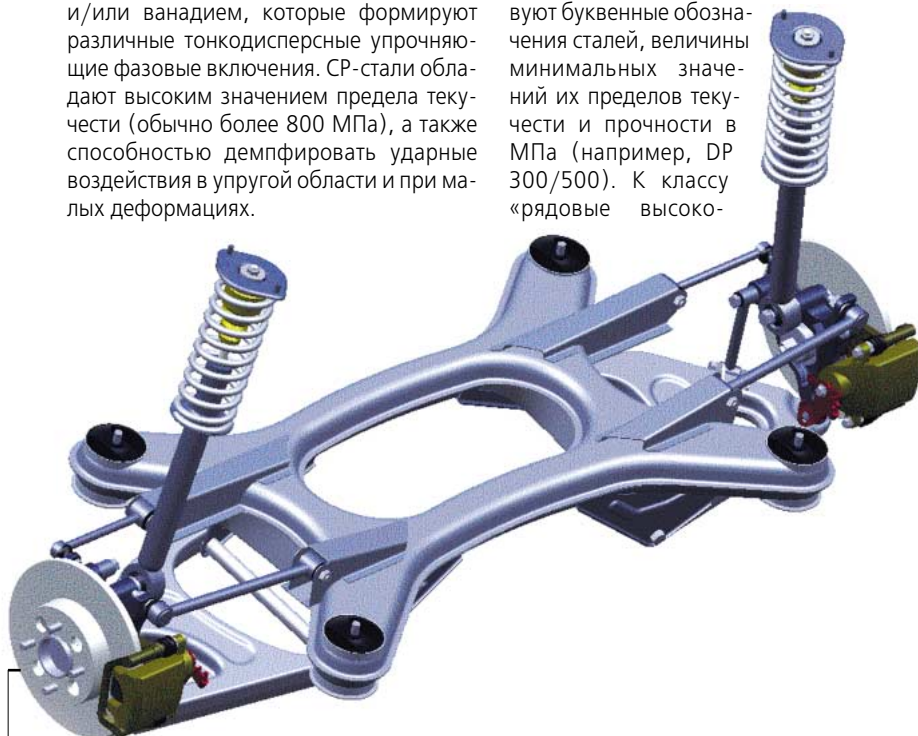
прочные стали» (conventional HSS) теперь отнесены Mild-, IF-, IS-, BH-, CMn- (марганцовистые) и HSLA- (высокопрочные низколегированные) стали, а к классу «усовершенствованные высокопрочные стали» (Advanced High Strength (AHSS) Steels) – DP-, CP-, TRIP- и Mart-стаи. Механические свойства вышеперечисленных сталей иллюстрируются диаграммой.

Различие механических свойств обусловлено тем, что DP-, CP- и TRIP-стаи имеют многофазную структуру, содержащую в строго определенных пропорциях мартенсит, бейнит и/или остаточный аустенит. Многофазная структура обеспечивает высокую степень упрочнения, сочетание хороших пластических свойств и высокой прочности при меньшем отношении σ_T/σ_B .

Эволюцию представлений о применении различных автосталей наглядно иллюстрируют две секторные диаграммы. Одна из них отражает общую концепцию USLAB, а другая – вполне конкретную концепцию среднеразмерного семейного седана, разработанного недавно в ходе выполнения мощной американской государственной автопрограммы PNGV (Partnership for a New Generation of Vehicles), координирующей свои разработки в рамках USLAB-AVC.

Видно, что акценты смещаются в сторону повышения прочностных характеристик, а доля AHSS- (DP-, CP- и TRIP-) сталей в этом «пироге» составляет более 80%. Следует отметить, что применение этих сталей позволило исключить применение дорогостоящего процесса горячего прессования заменив его профилированием листового металла, штамповкой и гидропрессованием. Попутно заметим, что совокупный процент P-, IS-, CMn- и низкоуглеродистых сталей не превышает 2%, а доля IF-сталей также невелика. Последнее можно объяснить тем, что IF-стаи могут проявлять относительно низкую ударную вязкость после формования или глубокой вытяжки. Тем не менее концерн JFE недавно 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.

Если говорить о ближайшей перспективе, то сейчас, например, активно разрабатываются высокопрочные ($\sigma_T>600$



МПа) аустенитные стали (Twinning Induced Plasticity (TWIP) steels), которые обладают очень высокими пластическими свойствами (полное удлинение более 80%). Уникальные свойства этих сталей высокомарганцевистых 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.

Вышеперечисленные примеры указывают на то, что акценты по использованию того или иного типа стали могут изменяться.

Выбор стали определяется в первую очередь ее механическими характеристиками, функциональной пригодностью для изготовления конкретного изделия, ценой (при прочих равных) и т.д. Например, по концепции ULSAB-AVC днище автомобиля изготавливается из стали TRIP 450/800, а не из стали серии DP. Дело в том, что прокат для данного элемента кузова подвергается наиболее существенной деформации в процессе производства, что позволяет извлечь максимальные преимущества по повышению его прочностных характеристик при применении TRIP-стали. В свою очередь, CP-стали могут быть использованы для изготовления бамперов или стоек кузова. Выбор стали для конкретного конструктивного элемента корпуса — тема отдельного обсуждения, предполагающая всестороннее рассмотрение способности стали поглощать ударную энергию при высоких динамических нагрузках, учет возможности нанесения на нее защитного покрытия, ее коррозионную стойкость и усталостную прочность и другие факторы.

Также отдельного обсуждения требуют вопросы дополнительной обработки автосталей. Например, поверхностное упрочнение содержащих титан IF-сталей при отжиге в среде аммиака достигается за счет образования твердой фазы Ti-N. Было установлено, что стальной прокат из азотированной IF-стали демонстрирует значительно более высокую стойкость к образованию вмятин, чем обычный IF-прокат с таким же пределом текучести.

Наноструктурированная сталь NANO Hiten (разработка JFE Steel) с высоким пределом текучести (780 МПа), обладая однофазной ферритной структурой, содержит в своей структуре термически стабильную упрочняющую дисперсную

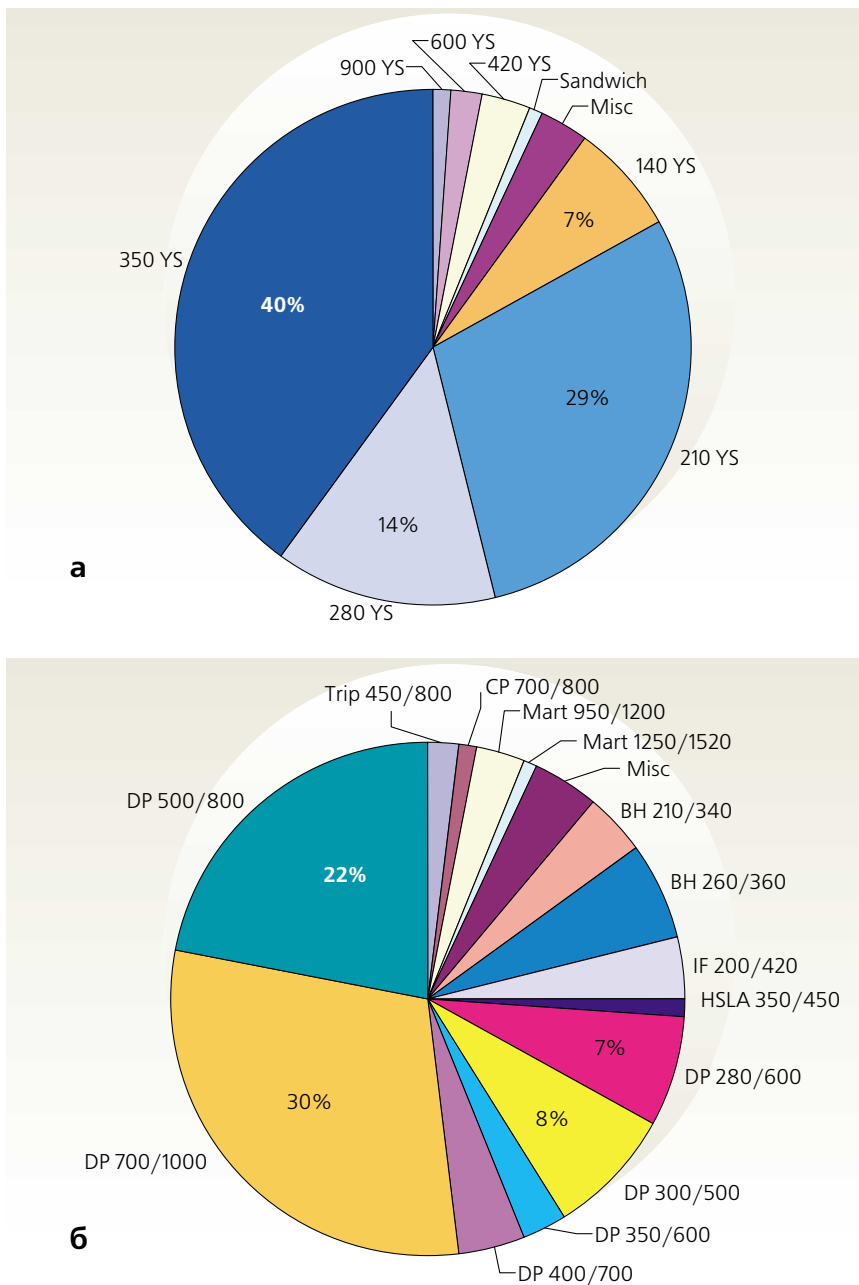


Рис. 3. Концепция применения автосталей в проектах YULSAB (а) и ULSAB-AVC (б)

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 цинкованию и уже используется для изготовления шасси и рамы автомобилей.

В заключение отметим, что производители стального автопроката вынуждены ускоренными темпами совершенствовать свою продукцию. Конкурирующие со сталями легкие полимерные и композиционные материалы уже сейчас составляют в среднем около 12% от веса автомобиля среднего класса. Например, недорогой, подвергающийся вторичной

переработке и окраске, высокопрочный несущий пластиковый кузов Dodge ESX3 компании Daimler Chrysler состоит всего из 12 (!) деталей (с упрочняющими элементами из алюминия), а его масса меньше стальной более чем на 40%. Специалисты финской фирмы Exel Oyj считают, что уже сейчас можно снизить вес автомобиля на 65%, применяя композиты на основе углеродного волокна вместо сталей. Подобные композиционные материалы уже применяются для изготовления кузовов грузовых автомобилей и карданных валов. Рессоры из стеклопластика, кузов из сверхпрочных композиционных материалов — вот, наряду с аналогичными конструкциями из новых легких сталей, будущее в развитии автомобилей массового производства.