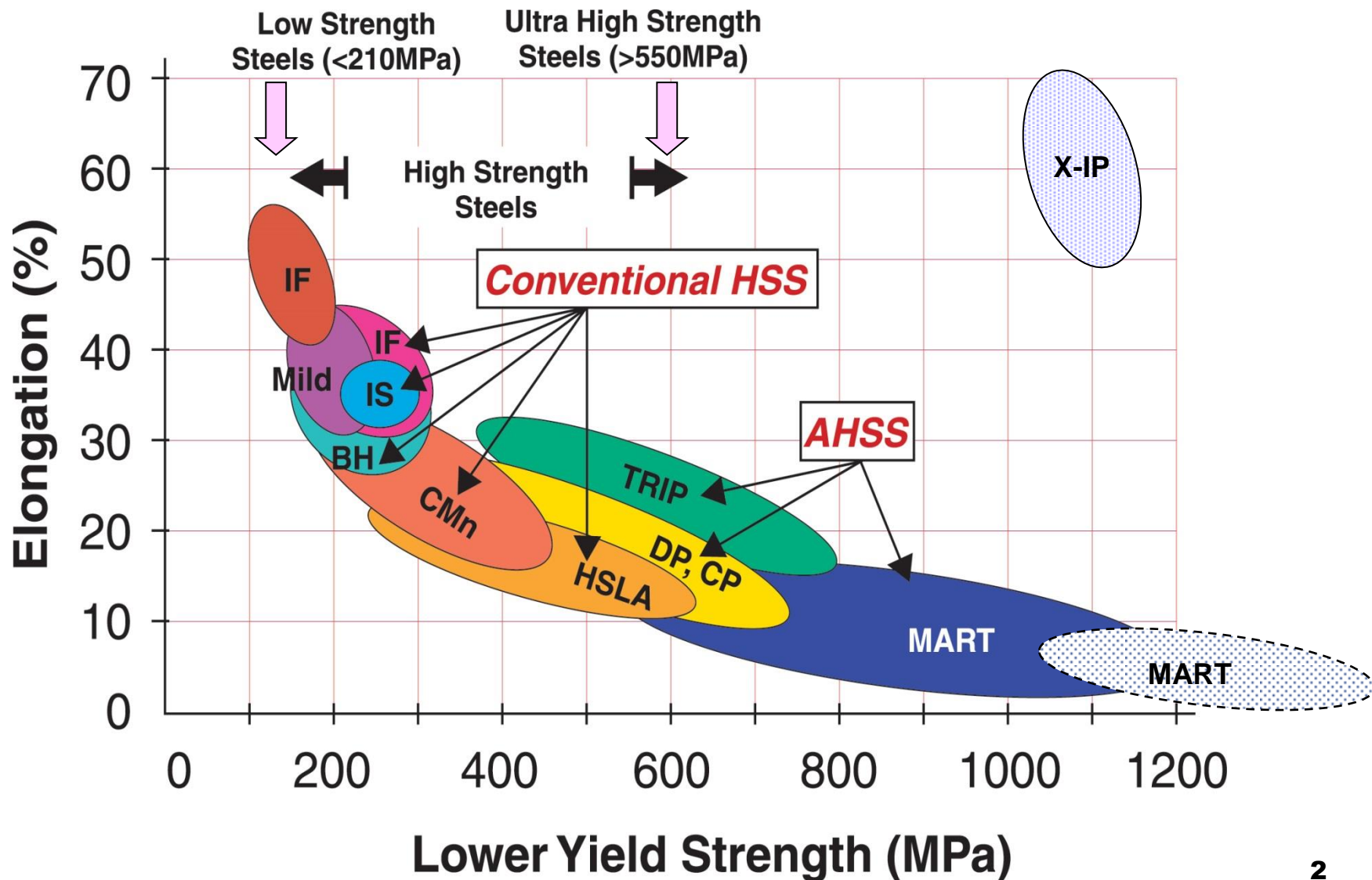


Высокопрочные штампуемые стали для автомобилестроения

Если обратиться к сталям для автомобильной промышленности, то окажется, что при их создании в значительной степени используются металловедческие идеи. Это можно объяснить, во-первых, мощной конкуренцией с другими металлами и неметаллическими материалами; во-вторых, высокими и разнообразными требованиями, часто противоречивыми, например: прочность и штампуемость и др.

В настоящее время повышение уровня требований по экономии топлива и безопасности эксплуатации автомобиля требует повышения прочности листа. Вместе с тем для обеспечения уровня технологичности производства металлопродукции сложной формы необходимо использовать лист из сверхвысокоштампуемых сталей. Большинство традиционно используемых путей повышения прочности автолиста приводит к уменьшению характеристик штампуемости, снижению величины коэффициента нормальной пластической анизотропии, а также увеличению упрочняемости при деформации.

Зависимость относительного удлинения от прочности различных типов сталей



Высокопрочные стали AHSS (Advanced High Strength Steels)

Семейство AHSS включает в себя двухфазные стали (DP), многофазные стали (CP), феррито-бейнитные стали (FB), мартенситные стали (MS), стали с пластичностью, наведенной превращением (TRIP), горячештамповочные и закаленные стали (HF), а также стали повышенной пластичности, инициируемые двойникованием (TWIP).

AHSS — стали с пределом прочности от 500 до 2000 МПа, которые предназначены для замены стандартных сталей и в основном используются для изготовления конструктивных элементов автомобиля. Это позволяет производителям выдерживать международные нормы по безопасности автомобиля при существенном снижении его веса — как для снижения энергопотребления, так и для уменьшения количества выбросов, загрязняющих окружающую среду.

В настоящее время идет работа над сплавами 3-го поколения AHSS. Это стали со специальными условиями легирования и термомеханической обработки, у которых улучшено соотношение прочностных и пластических свойств по сравнению с уже известными сплавами. Кроме того, использование этих сталей в автомобилестроении позволяет снизить стоимость изготавливаемых из них деталей транспортных средств.

Например, стали DP и TRIP, благодаря их способности поглощать энергию, отлично подходят для производства элементов, которые могут деформироваться при столкновении автомобиля.

Для конструктивных элементов салона используются особо высокопрочные стали, такие как мартенситная и борсодержащая упрочненная сталь, которая обеспечивает повышенные показатели безопасности.

Классификация автолистовых сталей (сверхлегкий кузов автомобиля)

Применяемые типы стали:		Прогрессивные типы сталей (AHSS):	
Mild	мягкая низкоуглеродистая сталь (08Ю)	DP	двухфазная
IF	сверхнизкоуглеродистая повышенной штампуемости («Interstitial-Free» - свободная от атомов внедрения)	CP	многофазная
BH	сверхнизкоуглеродистая с ВН-эффектом («Bake Hardening» - упрочнение при сушке)	TRIP	с ТРИП-эффектом («TRansformation Induced Plasticity» - пластичность, наведенная превращением)
		(X-IP)	повышенной пластичности (eXtreme high strength and formability by Induced Plasticity)
CMn	марганцовистая	Mart (MS)	мартенситная
HSLA	низколегированная повышенной прочности		

Высокопрочная автолистовая сталь $\sigma_T = 210 - 550$ МПа

Ультравысокопрочная автолистовая сталь $\sigma_T \geq 550$ МПа.

(В настоящее время на отечественных заводах освоены:

HSLA горячекатаные стали с $\sigma_m \geq 500$ Н/мм²,

холоднокатаные стали $\sigma_m \geq 350$ Н/мм²,

горячекатаные и холоднокатаные стали DP500, DP700 с $\sigma_m \geq 500$ Н/мм²).

Механизмы упрочнения углеродистых и низколегированных сталей

- твердорастворное упрочнение (C, N, P),
- упрочнение измельчением зерна (или другие варианты диспергирования структурных составляющих),
- дисперсионное твердение (упрочнение дисперсными частицами),
- упрочнение путем создания в ферритной матрице высокопрочных структурных составляющих.

Традиционные стали
(IF-стали,
стали с ВН-эффектом,
низколегированные HSLA)

Перспективные стали
(DP, Trip, CP, Mart)

Стали без фаз внедрения – IF-стали (Interstitial Free (IF) steels)

Высокопластичные IF-стали – это стали с микродобавками сильных карбидо- и нитридообразующих элементов – титана или/и ниобия, содержащие сверхнизкое количество углерода ($\leq 0,005\%$), который вместе с азотом полностью связан в карбиды, нитриды и карбонитриды (т.е. стали, свободные от атомов внедрения).

Прочность обусловлена упрочнением твердого раствора кремнием, марганцем и фосфором. Низкие величины отношения σ_T/σ_B и высокий коэффициент деформационного упрочнения обеспечивают превосходную глубокую вытяжку и хорошее перераспределение напряжений, что гарантирует высокие прочностные свойства и однородность толщины штампованных деталей кузова, делая их пригодными для глубокой вытяжки.

Использование IF-сталей вместо рядовых низкоуглеродистых (типа 08Ю) обеспечивает при сохранении прочности снижение массы, пропорциональное глубине вытяжки.

Химический состав IF-сталей

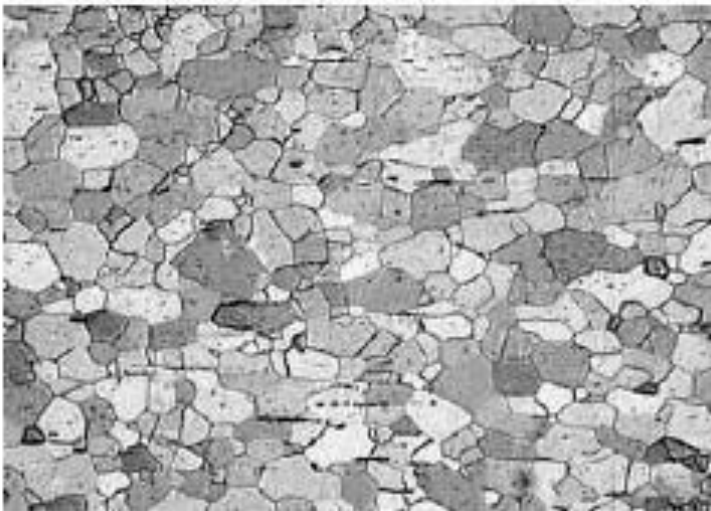
Производитель	Химический состав стали, % мас.					
	<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Al</i>	<i>N</i>
Kawasaki Steel	≤ 0,002	0,18	0,006	0,007	0,028	0,002
National Steel	≤ 0,0025	0,20	0,006	0,007	0,028	0,002
Sollac	≤ 0,003	0,20	0,003	0,009	0,017	0,003
ОАО «НЛМК»	≤ 0,003	0,18	0,012	0,012	0,06	0,005
ОАО «Север-сталь»	≤ 0,003	0,12	0,009	0,008	0,032	0,0054
ОАО «ММК»	≤ 0,003	0,15	0,009	0,008	0,018	0,007

Химический состав, структура, свойства и применение IF-стали

- Типичный химический состав IF-стали следующий, мас. %:
0,002 C; 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 легирование фосфором, кремнием, марганцем и бором повышает прочностные характеристики IF-сталей.
- Сталь IF 260 содержит, мас. %:
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.

Микроструктура стали – феррит.

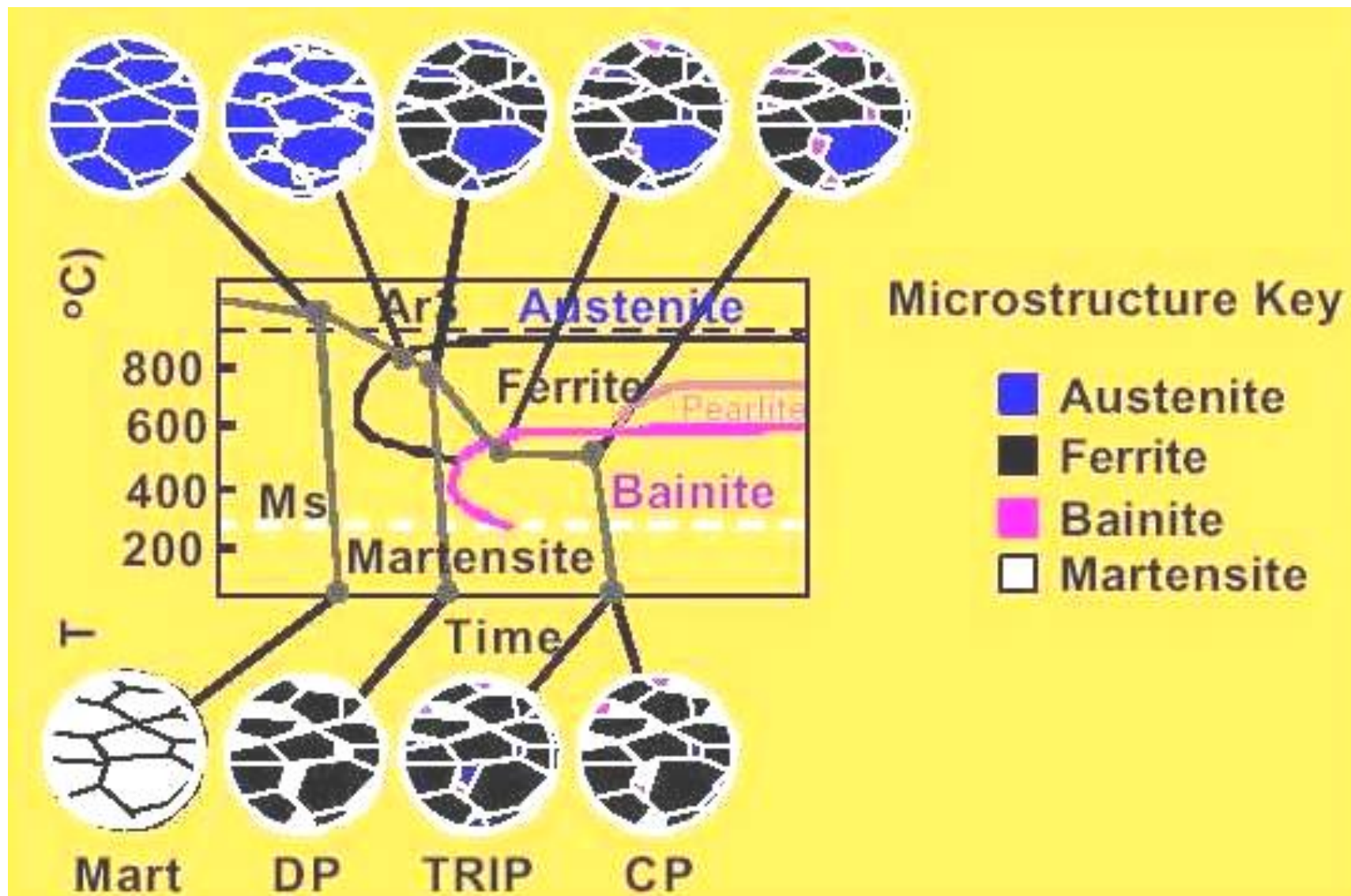
- IF-сталь, например, IF 180, имеет способность к вытяжке, аналогичную стали для глубокой вытяжки, в то же время обеспечивает временное сопротивление на уровне стали 220 МПа.



Микроструктура стали IF 180

- Эти стали применяются для изготовления различных деталей, в том числе лицевых: дверей, арок колес, капотов, а более прочные стали – для элементов жесткости, деталей шасси и др.

Зависимость структуры стали от скорости и режима охлаждения



Технологии производства двухфазной (многофазной) стали

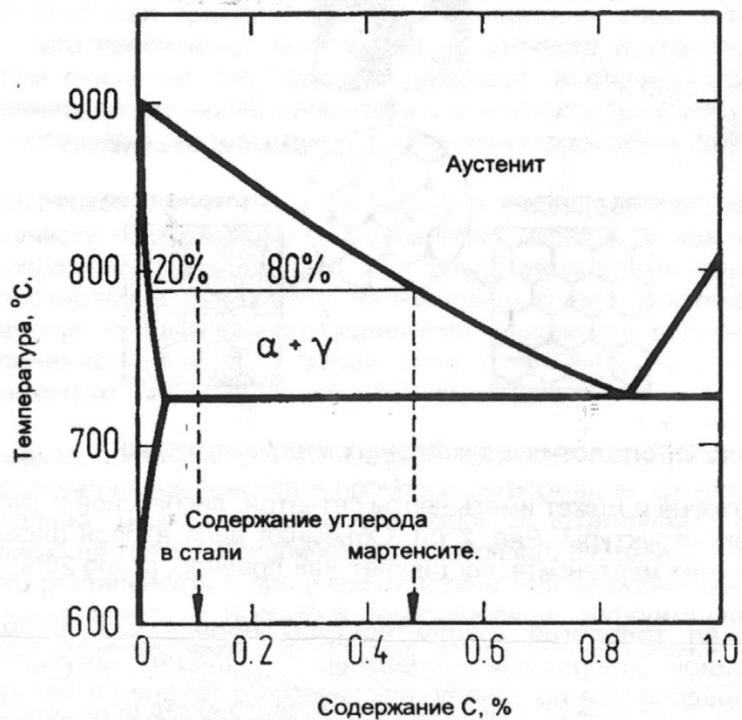
В качестве ДФМС для холодной штамповки чаще всего используются низкоуглеродистые низколегированные стали с **0,05-0,12 % C, 1-2 % Mn, 0,5-1,5 % Si, с небольшими добавками ванадия или с добавками около 0,5 % Cr и 0,1-0,4 % Mo.** Увеличение содержания Si, Mn и Cr обеспечивает повышение прочности. Использование 0,038 % Nb улучшает как прочностные, так и пластические свойства вследствие более мелкозернистой структуры. После термической обработки $\sigma_{0,2} = 300-450$ МПа, $\sigma_B = 600-850$ МПа, $\delta = 20-30$ %, а после штамповки - $\sigma_{0,2} = 450-600$ МПа.

Отечественной промышленностью наиболее освоены ДФМС марок 03ХГЮ, 06ХГСЮ ($\sigma_{0,2} = 200-370$ МПа, $\sigma_B = 420-730$ МПа, $\delta = 28-38$ %).

Для холоднокатаного листа: стандартный метод получения двухфазной структуры из 80 % феррита и 20 % мартенсита: нагрев в межкритический интервал, выдержка при 800 °С, закалка из межкритического интервала температур $A_1 - A_3$ (т.е. из двухфазной области $\alpha + \gamma$ от температуры, обеспечивающей получение 20 % аустенита (который при достаточно быстром охлаждении превращается в мартенсит).

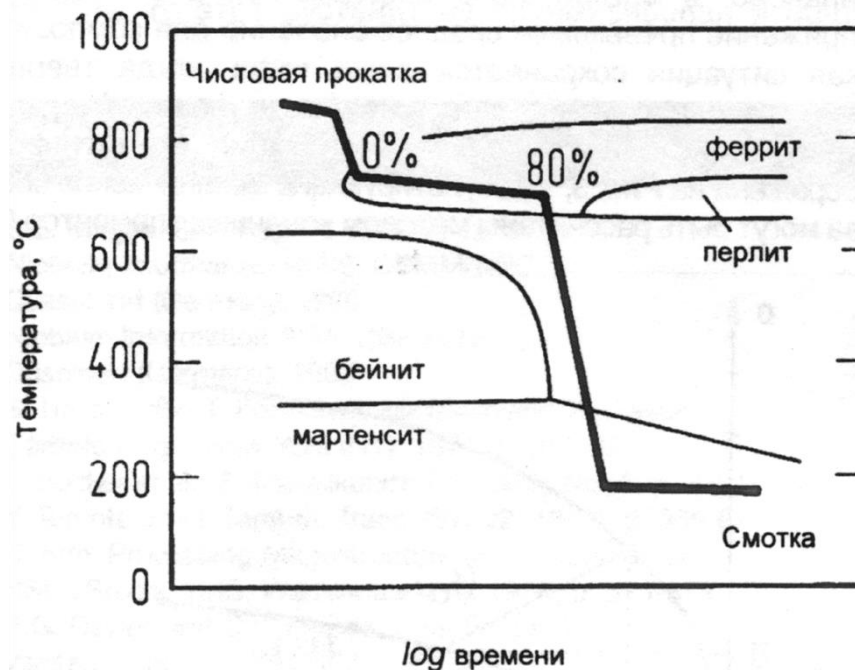
Для горячекатаной полосы необходимо оптимизировать легирование, температурный режим прокатки, условия охлаждения на выходном рольганге и температуру смотки таким образом, чтобы получить требуемую структуру сразу в состоянии после прокатки. При этом при обычной температуре смотки около 650 °С вторая структурная составляющая представляет собой перлит, дающий наиболее низкую прочность. При температуре смотки около 250 °С, когда второй фазой является мартенсит, обеспечивается наивысший уровень прочности при сохранении высокой пластичности. При средней температуре смотки около 450 °С получается трехфазная структура, содержащая бейнит и мартенсит, что обеспечивает наилучшую пластичность при среднем уровне прочности.

Технологии производства двухфазной (многофазной) стали

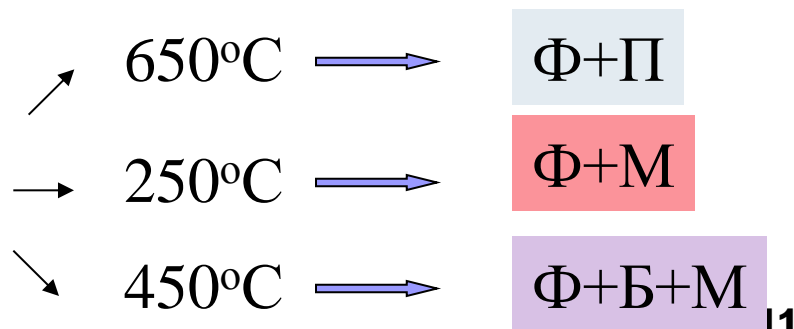


Закалка из межкритического интервала или межкритический отжиг

Температура смотки г/к полосы

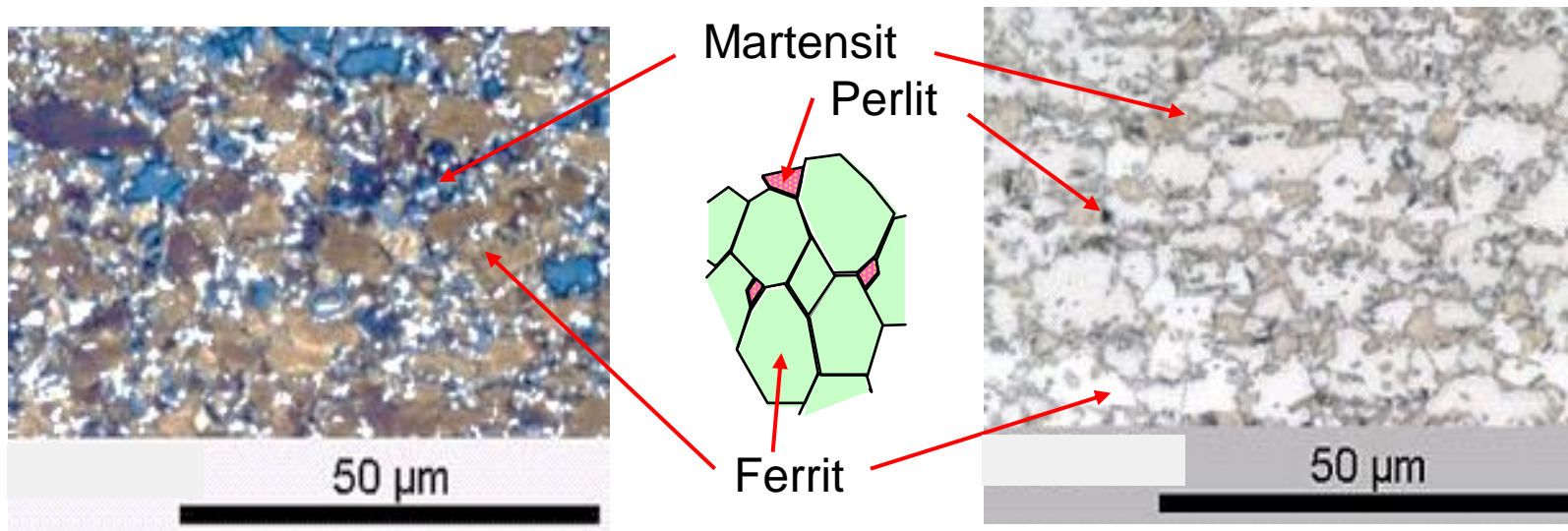


Ступенчатое охлаждение



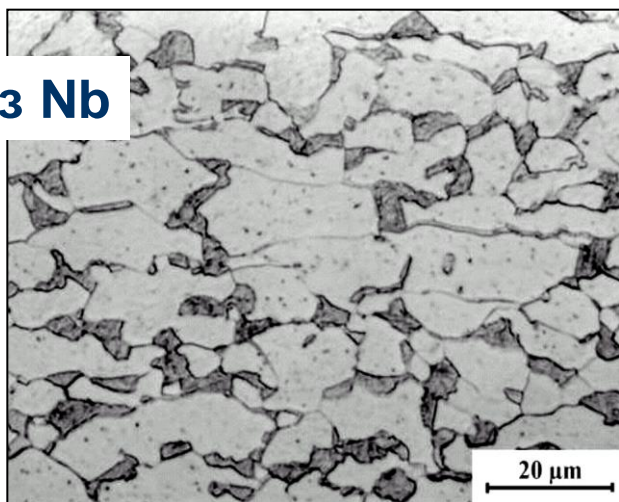
Двухфазные феррито – мартенситные стали (DP-стали)

Структура: 20-30 % М + Ф



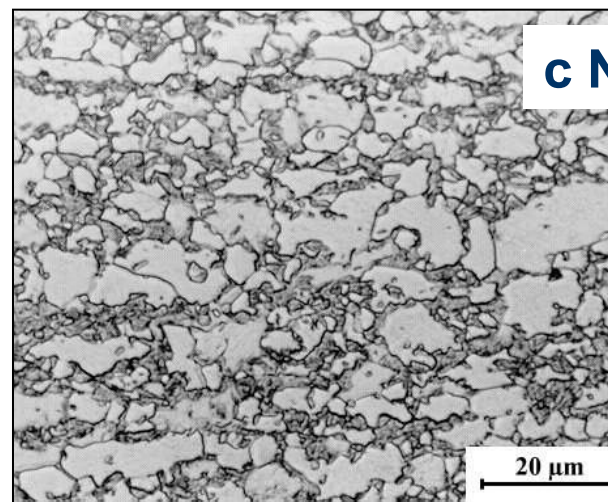
Состав: 0,05-0,12 %C; 1-2 %Mn; 0,5-1,5 %Si; ~ 0,5 %Cr; 0,1-0,4 %Mo; 0,07 %P; 0,02-0,04 %Nb

без Nb

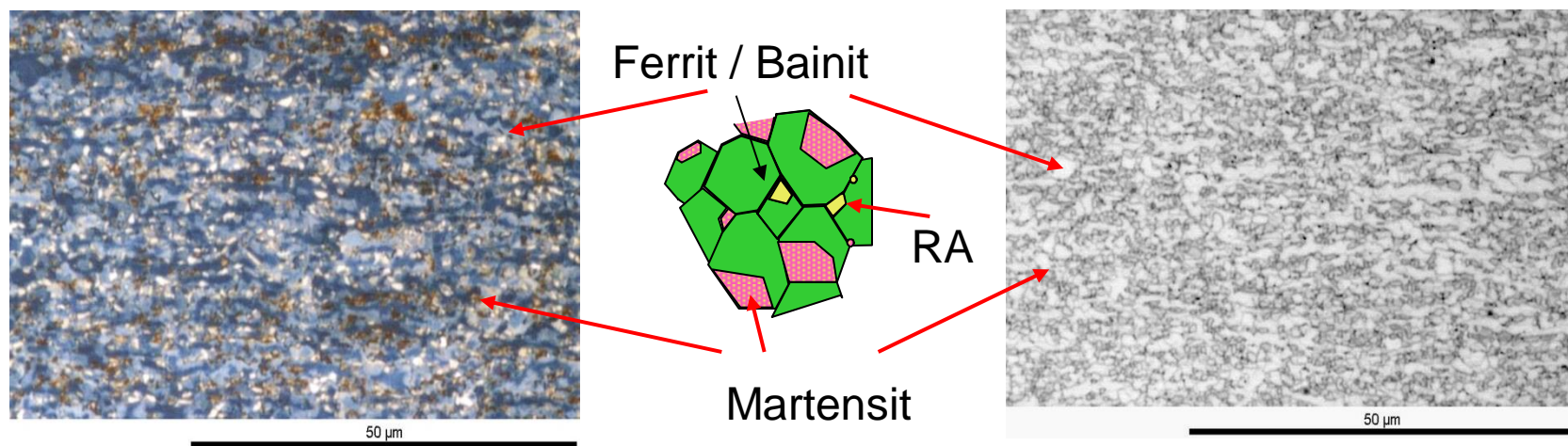


Структура
стали DP800

с Nb



Многофазные СР (Complex Phase) стали

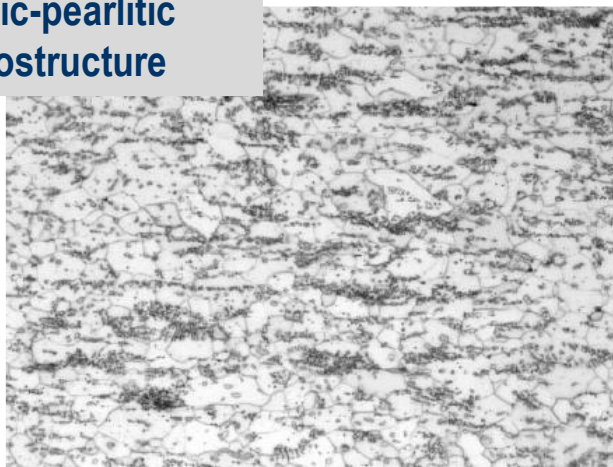


Особенность - изменение свойств феррита за счет микролегирования Nb, Ti, V

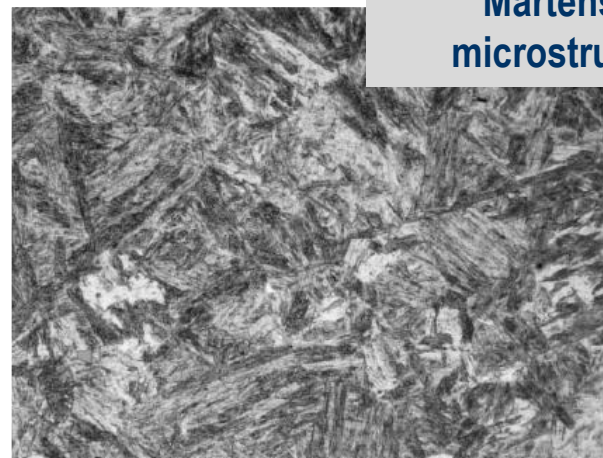
Мартенситная (закаленная) бористая сталь Usibor 1500

Состав: 0,22 % C; 1,2 % Mn; 0,15 % Cr; 0,002 % B

Ferritic-pearlitic
microstructure



Martensitic
microstructure



Технологические условия обработки стали с ТРИП-эффектом

Наиболее перспективным материалом с точки зрения сохранения феноменально высокого уровня пластичности при очень высоком уровне прочности (σ_B – до 600-800 МПа, δ – до 30 %) считаются стали с ТРИП-эффектом, в которых аустенитная фаза сохраняется до низких температурах и при деформации при комнатной температуре постепенно превращается в мартенсит, обеспечивая повышенную степень удлинения. Образование мартенсита деформации обеспечивает дополнительное упрочнение, предотвращает локализацию деформации (образование шейки при растяжении), обеспечивает равномерную деформацию по всей длине образца. При этом благоприятное влияние мартенсита на пластичность стали проявляется лишь тогда, когда образование мартенсита сопровождается началом локализации деформации; более раннее образование мартенсита ухудшает пластичность.

Для этого необходимо наличие значительного количества аустенита, стабильного при комнатной температуре. Наиболее дешевый способ стабилизации аустенита – его обогащение углеродом. Технологические условия в этом случае должны предусматривать двухстадийную термообработку: 1) Выдержка в двухфазной области $A_1 - A_3$ (780-790 °С); в стали с 0,20-0,14 % С получается 50 % аустенита и 50 % феррита. При этом содержание углерода в аустените составит около 0,4 %. 2) Изотермическая выдержка в области бейнитного превращения 450 °С. При этом часть аустенита превращается в бейнит, и формируется структура, состоящая примерно из 38 % бейнита, 50 % феррита и 12 % остаточного аустенита, который в процессе образования бейнита обогатится углеродом до содержания 1,0-1,2 %.

Особенности химического состава стали с ТРИП-эффектом

Поскольку высокая пластичность стали с ТРИП-эффектом является следствием образования мартенсита в процессе деформации, то хорошая штампуемость зависит не только от количества остаточного аустенита, но и от его стабильности в процессе пластической деформации: остаточный аустенит в процессе пластической деформации должен постепенно превращаться в мартенсит. Низкоуглеродистые стали демонстрируют именно такое поведение остаточного аустенита.

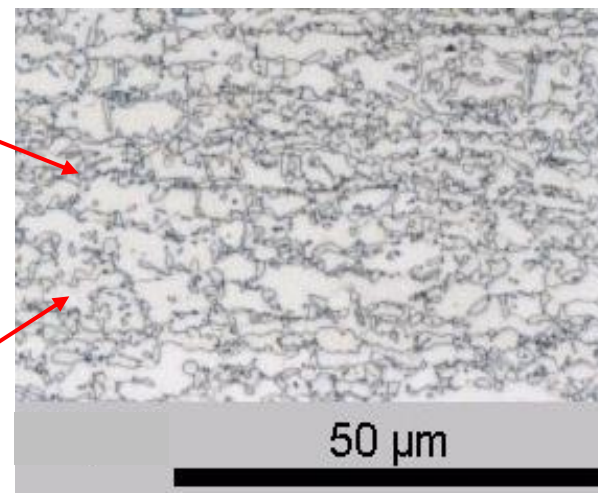
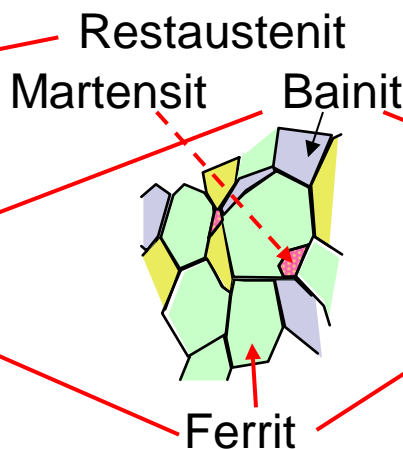
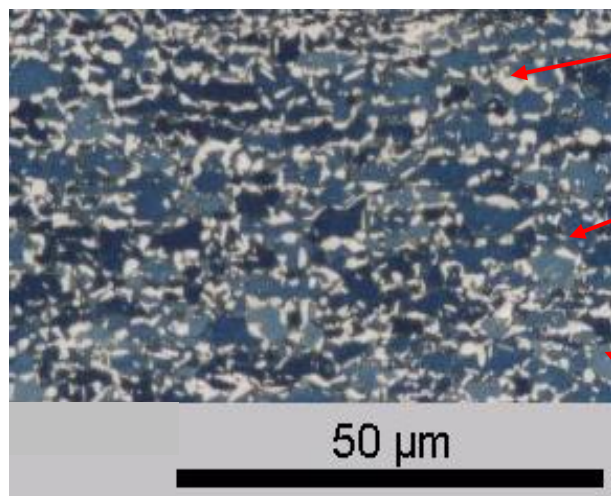
Высокопрочные штампуемые стали с ТРИП-эффектом должны содержать 1-2 % Si (или аналогичные ему стабилизаторы феррита). Кремний способствует образованию некоторого количества доэвтектоидного феррита во время охлаждения после нагрева в межкритическом интервале, замедляет выделение цементита в процессе бейнитного превращения, что способствует диффузии углерода в аустенит и усиливает его обогащение углеродом. Кроме того, такие стали, как правило, содержат 0,9 – 1,8 % Mn, способствующего снижению температуры превращения и увеличению количества остаточного аустенита. Установлено также, что микролегирование ниобием улучшает как пластические, так и прочностные свойства, что является следствием получения более мелкозернистой структуры, а также увеличивает количество остаточного аустенита даже при недлительном отжиге. Таким образом, в качестве базового состава высокопрочной штампуемой стали с ТРИП-эффектом можно принять следующий: 0,12 – 0,14 % C, 0,9 – 1,8 % Mn, 1-2 % Si.

Технологические условия обработки стали с ТРИП-эффектом



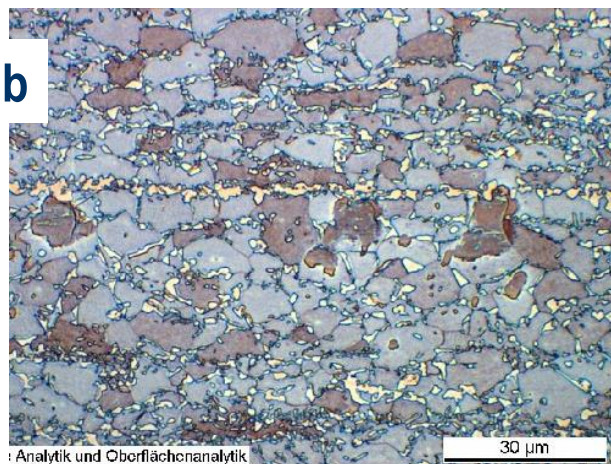
Стали с ТРИП-эффектом (TRIP-стали)

Структура: 38 % Б + 50 % Ф % + 12 % А ост



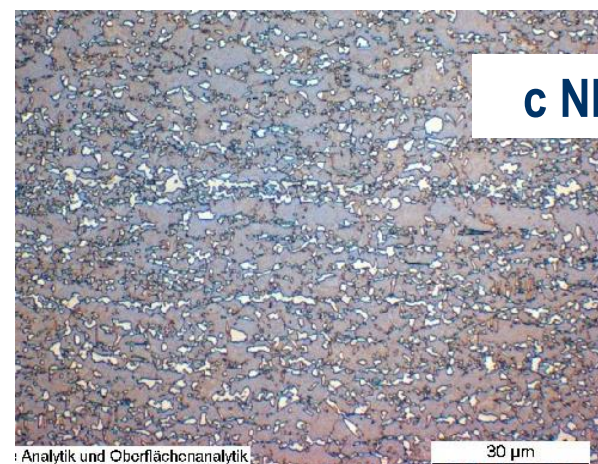
Состав: 0,12-0,20 % C, 0,9-1,8 % Mn; 1-2 %Si

без Nb

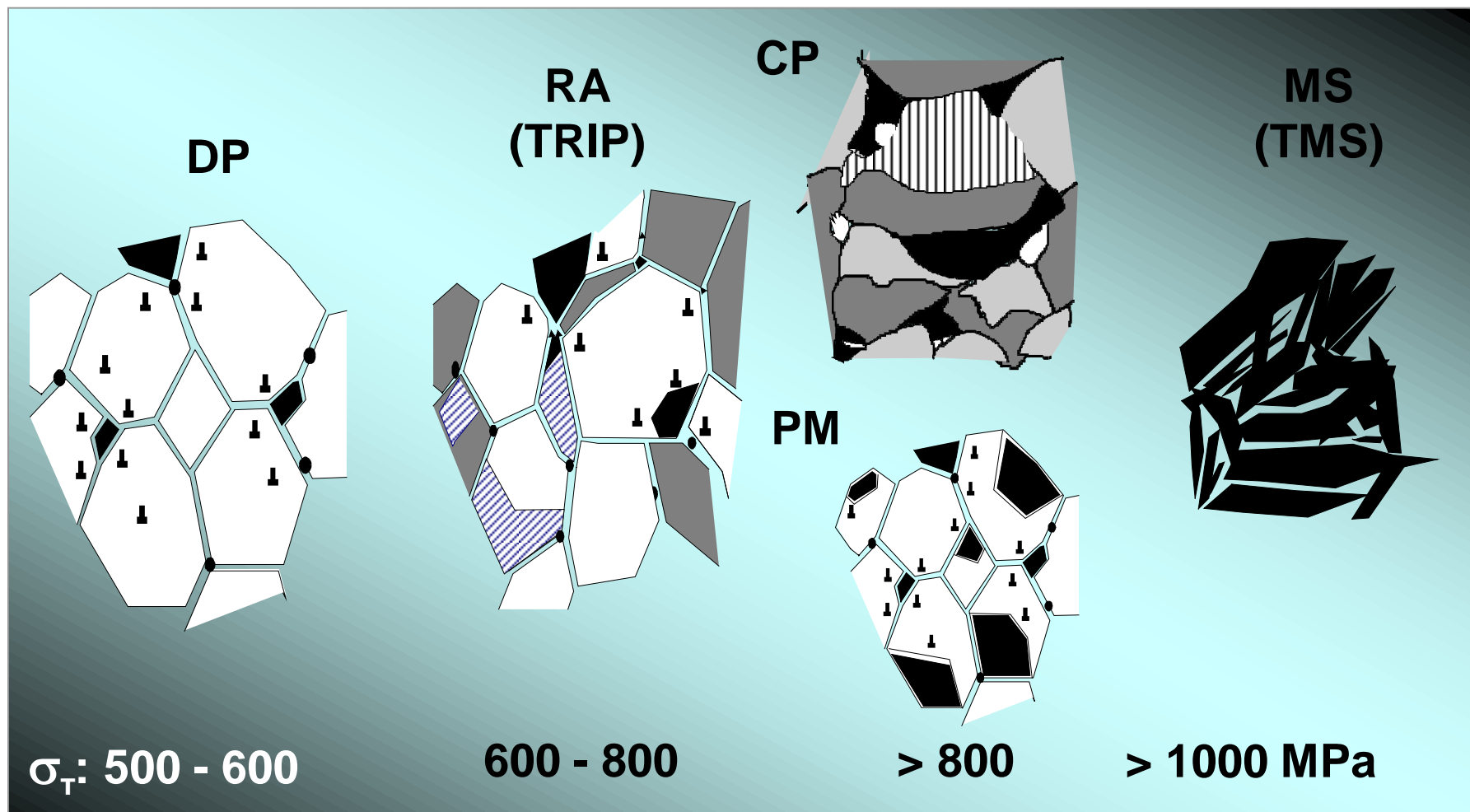


Структура стали
TRIP 700

с Nb



Связь между прочностью и фазовым составом стали



Ferrit

met. Austenit

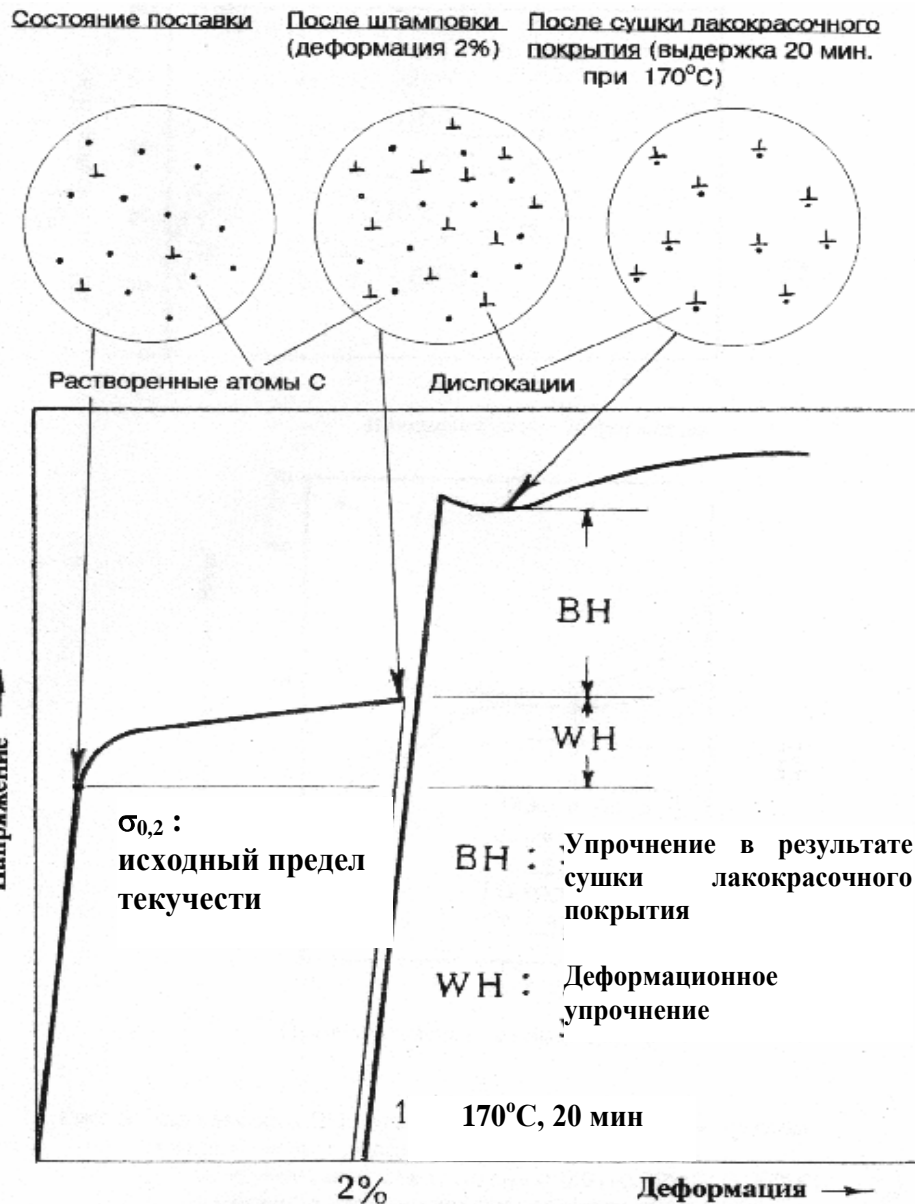
Bainit

Martensit₁₈

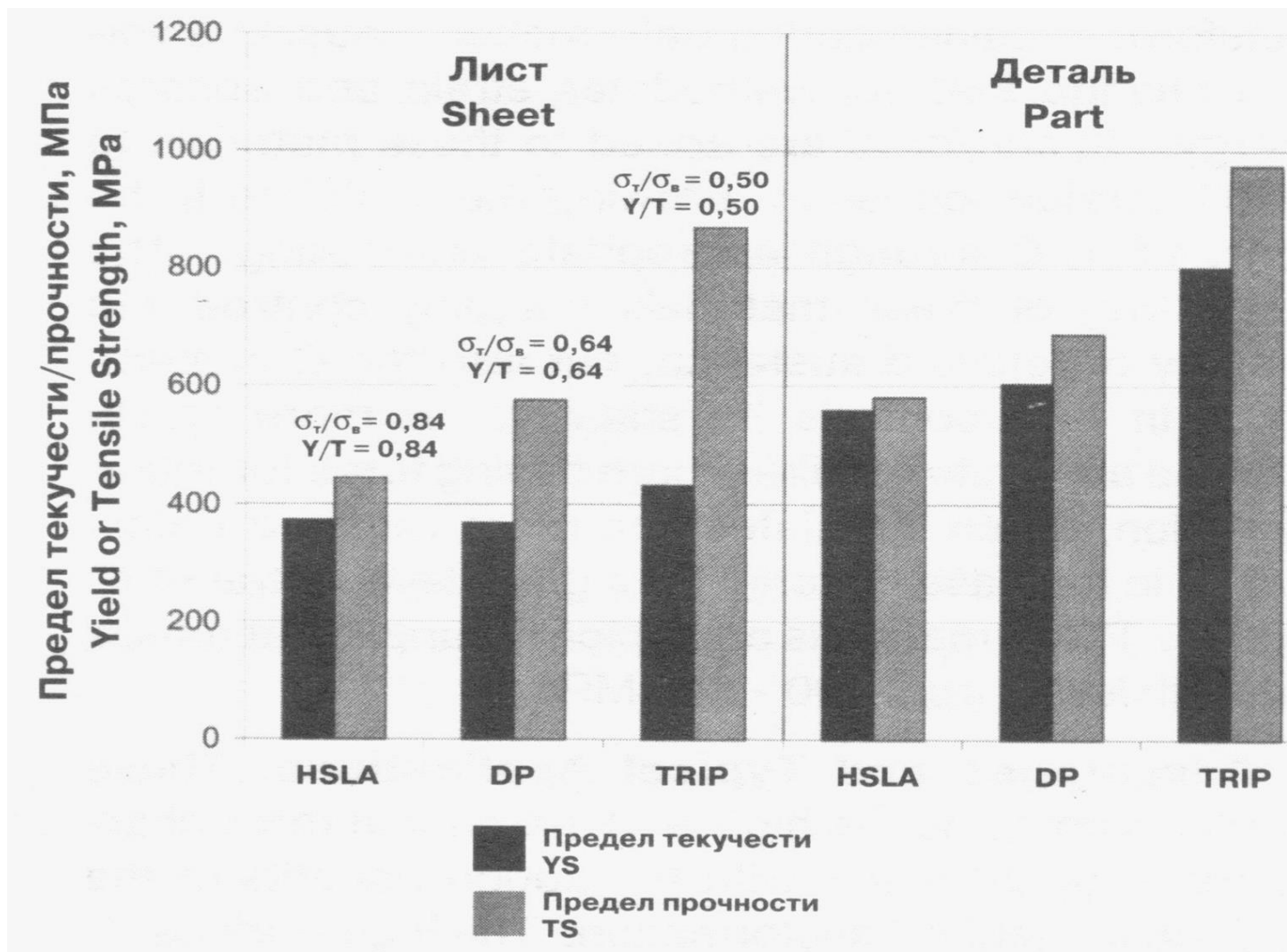
Схема формирования ВН-эффекта и его оценки при испытании на растяжение

Химический состав сталей марок 01ЮТБ и 01ЮПТБ

Марка стали	Химический состав, мас.%							
	C	Si	Mn	P	Al	N	Ti	Nb
01ЮТБ	0,003-0,004	0,01	0,12	0,006	0,03	0,005	0,010	0,017
01ЮПТБ	0,003-0,006	0,01-0,02	0,11-0,13	0,055-0,060	0,02-0,04	0,004-0,006	0,010-0,017	0,015-0,017



Механические свойства HSLA, DP и TRIP до штамповки (лист) и после штамповки



Преимущества и недостатки двухфазных (DP) сталей

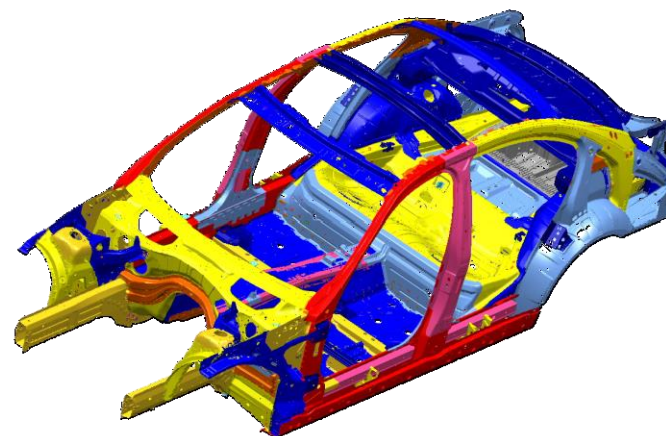
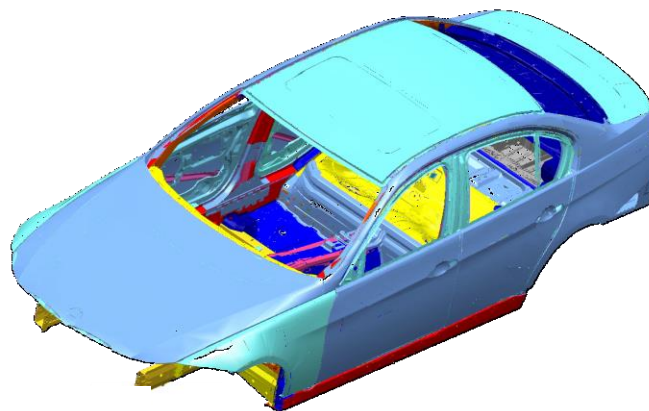
Преимущества двухфазных (DP) сталей по сравнению с высокопрочными низколегированными сталями HSLA

- у DP-сталей при равном уровне предела текучести более высокий предел прочности и коэффициент деформационного упрочнения, более низкое отношение $\sigma_t/\sigma_{0.2}$ чем у HSLA-сталей.
- у DP-сталей больше величина ВН-эффекта

Недостатки DP-сталей по сравнению с HSLA

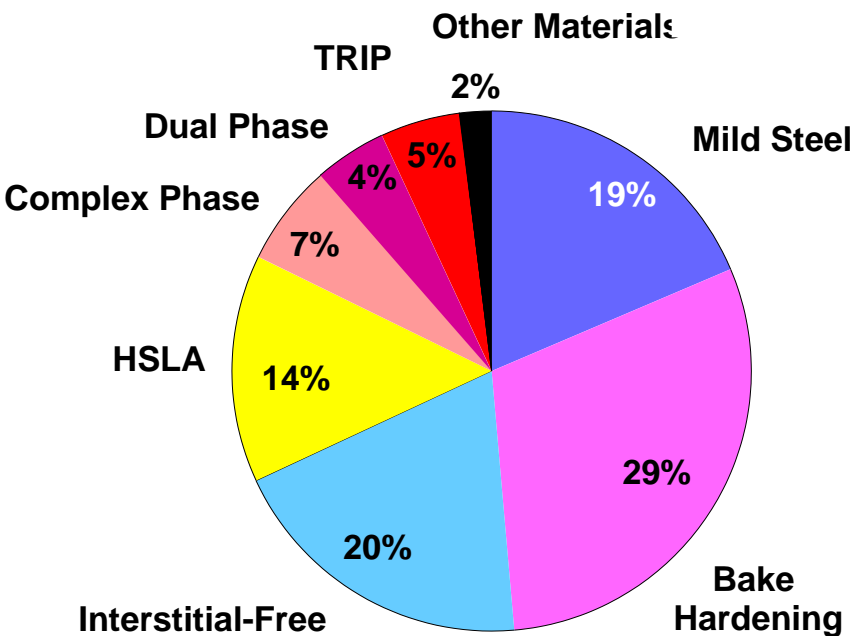
- DP-стали требуют очень высокой культуры производства и/или наличия специального оборудования (особенно при производстве холоднокатаных DP-сталей).
- HSLA-сталь можно получать на стандартном типовом оборудовании (прокатном и термическом), имеющимся на большинстве металлургических заводов, производящих автолистовые стали

Использование высокопрочных сталей в корпусе автомобиля



Steel grade
(yield strength)

- DC 03/04/06
- DX 54
- DX 56
- 180 MPa
- 220 MPa
- 260 MPa
- 300 MPa
- 340 MPa
- 380 MPa
- 400 MPa
- 420 MPa
- 500 MPa
- 680 MPa
- 950 MPa



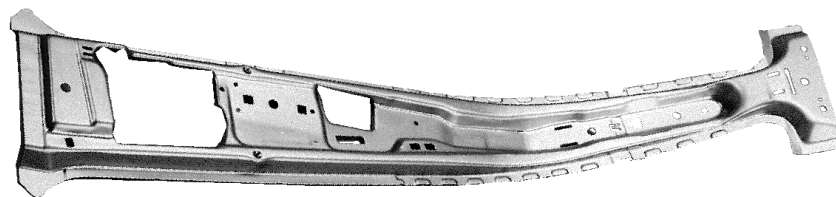
Области применения высокопрочных низколегированных сталей

- Энергопоглощающие элементы конструкции: усилители дверей, рамы, конструктивные элементы кузова, бамперы
- Детали, работающие на усталость: диски колес, лонжероны

Типичные детали, для изготовления которых используется холоднокатаная низколегированная сталь



поперечная балка



усиление центральной стойки

Примеры использования холоднокатаных двухфазных сталей и ТРИП сталей

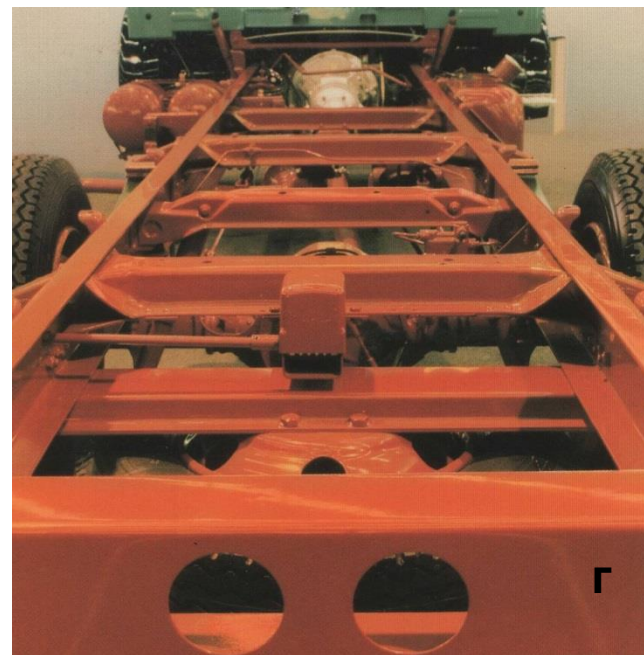
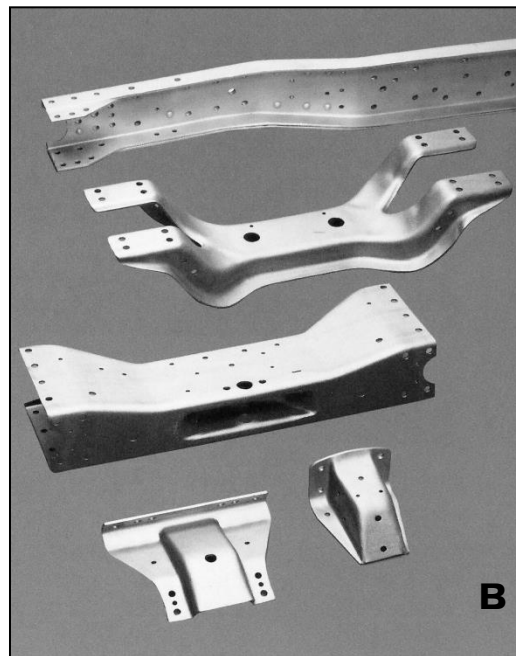


траверса, толщина 0,8 мм



продольная балка, толщина 1,0 мм

Примеры использования горячекатаных полос из низколегированных, двухфазных и ТРИП сталей



- а – диски колес
- б – диагональный рычаг передачи
- в – различные профили для автомобилей
- г – рама грузового автомобиля

Стали 3-го поколения AHSS.

CHEVY MALIBU

-300 LBS
-136 KG



SKODA SUPERB

-165 LBS
-75 KG



NISSAN MAXIMA

-82 LBS
-37 KG



HONDA PILOT

-300 LBS
-136 KG



CHEVY CRUZE

-115 LBS
-52 KG



CHRYSLER PACIFICA

-250 LBS
-113 KG



GM ACADIA/DENALI

-700 LBS
-318 KG



PEUGEOT 3008

-220 LBS
-100 KG

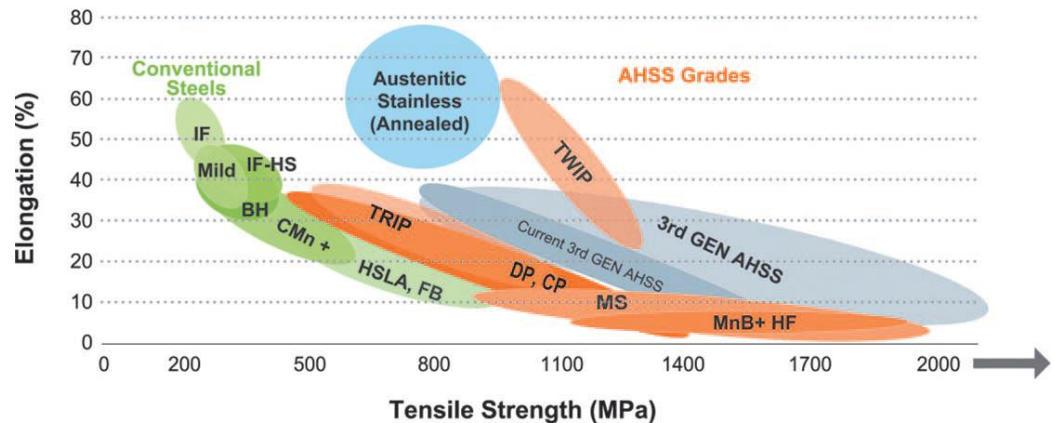


В настоящее время идет работа над сплавами 3-го поколения AHSS. Это стали со специальными условиями легирования и термомеханической обработки, у которых улучшено соотношение прочностных и пластических свойств по сравнению с уже известными сплавами. Кроме того, использование этих сталей в автомобилестроении позволяет снизить стоимость изготавливаемых из них деталей транспортных средств.

Например, стали DP и TRIP, благодаря их способности поглощать энергию, отлично подходят для производства элементов, которые могут деформироваться при столкновении автомобиля.

Для конструктивных элементов салона используются особо высокопрочные стали, такие как мартенситная и борсодержащая упрочненная сталь (PHS), которая обеспечивает повышенные показатели безопасности.

В настоящее время уже разработаны марки стали с пределом прочности 1200 МПа и трехкратным повышением пластичности. Широкий спектр свойств инновационных сталей лучше всего иллюстрирует знаменитая диаграмма прочности и пластичности стали, представленная на рисунке.



Стали 3-го поколения AHSS

Ожидается, что данные марки сталей позволят создавать еще более легкие, но, в то же время, более прочные конструкции, тем самым еще больше снижая углеродный след автомобиля.

Высокая прочность, пригодность для вторичного использования и гибкость дают преимущества стали как материалу, наиболее подходящему для следующего поколения автомобилей. К числу таких преимуществ относится соответствие требованиям к массе автомобиля, к безопасности эксплуатации и к улучшению экологической ситуации в мире. И всё это при небольших дополнительных затратах или даже без них.

Разработчики конструкции автомобиля должны учитывать многочисленные и сложные условия нагрузки, жизненно важные для управляемости автомобиля, а также экстремальные требования к прочности. Есть множество примеров, когда автопроизводители использовали AHSS для достижения более высокой прочности и надежности автомобилей. Вот краткое описание некоторых из них.

В **Jeep Compass** 2017 года было реализовано инженерное решение «каркас безопасности», который более чем на 65 % состоял из высокопрочной стали (AHSS).

В 2016 году автомобиль **Шевроле Malibu** был представлен с более прочным, но при этом более легким кузовом, что повысило его эффективность и динамику вождения. Более широкое использование высокопрочных сталей позволило инженерам разработать конструкцию кузова, в котором некоторые элементы были выполнены из более тонкой стали, что, тем не менее, обеспечило сопоставимые с более тяжелыми моделями свойства. Например, такие как поглощение энергии при столкновении.

Шевроле Malibu 2016



Jeep Compass 2017



Стали 3-го поколения AHSS

В конструкции **Kia Forte 2019** года после редизайна 54 % компонентов выполнено из усовершенствованной высокопрочной стали (AHSS), повышающей безопасность и жесткость на кручение на 16 %.

Honda Accord 2018 года, победившая в номинации «Автомобиль года 2018», имеет более легкую и жесткую конструкцию кузова, которая на 29 % состоит из сверхвысокопрочной стали, что является наиболее широким применением этого материала для снижения веса в любом серийном автомобиле Honda. В целом в новом Accord используется 54,2 % высокопрочной стали (выше 440 МПа).

Внедорожник **Volvo XC40–2018** установил новый стандарт безопасности. Его каркас разработан для максимальной защиты пассажиров во всех типах аварийных ситуаций. 20 % конструкции от общей массы автомобиля изготовлено из горячеформованной борсодержащей стали (AHSS).

Сталелитейная промышленность продолжает идти в ногу с задачами, которые ставит перед ней автомобилестроители, инвестируя в исследования и разработки значительные силы и средства, чтобы использовать на благо человечества удивительные свойства стали.

