На правах рукописи

Гук Сергей Владимирович

Неравномерность пластической деформации холоднокатаных сталей повышенной прочности в процессах листовой штамповки

Специальность 05.16.05 - «Обработка металлов давлением»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2006 г.

Работа выполнена в Московском государственном институте стали и сплавов (технологическом университете) (МИСиС) на кафедре обработки металлов давлением (Россия) и во Фрайбергской Горной Академии (ФГА) в институте обработки металлов давлением (Германия) в рамках научно-технического сотрудничества МИСиС и ФГА.

Научные руководители:

Доктор-инженер, профессор Кавалла Рудольф (Германия)

Доктор технических наук, профессор Смирнов Олег Михайлович (Россия)

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор Чиченев Николай Алексеевич

Кандидат технических наук Гладков Вадим Исаакович

Ведущая организация: ОАО Московский металлургический завод «Серп и молот»

Защита состоится 16 июня 2006 г. в 12-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.132.09 при Московском государственном институте стали и сплавов (технологическом университете) по адресу: 119049, Москва, ГСП-1, Ленинский проспект, 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан 16 мая 2006 года.

Справки по телефону: (095) 955 01 27.

Ученый секретарь диссертационного совета Ионов С.М.

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Задача эффективного использования высокопрочных материалов в процессах холодной листовой штамповки (ХЛШ) тесно связана с определением характеристик предельной пластичности и сопротивления разрушению. Практика ХЛШ показывает, что применяемые в настоящее время оценочные показатели не всегда дают достоверную информацию о запасе деформационной пластичности высокопрочного холоднокатаного листового проката. В связи с этим особую актуальность приобретает комплексный подход к оценке штампуемости листовой стали, использующий наряду со стандартными механическими характеристиками также структурные факторы, влияющие на процесс развития макро- и микропластической неравномерности деформации. Макропластическая неравномерность и штампуемость, как известно, существенно зависят от технологических факторов, формирующих микроструктуру стали и обуславливающих ее физико-химическую неоднородность, результат воздействия которой на пластические свойства и штампуемость бесспорен. Пластичность и сопротивление вязкому разрушению сплавов при обработке давлением определяются в конечном счете способностью материала течь без локализации деформации. Ранняя потеря устойчивости пластического течения является причиной пониженной технологической пластичности сплавов, приводящей к снижению сопротивления разрушению и появлению вязкой трещины. Очевидно, что основные факторы, влияющие на потерю устойчивости течения, связаны с микроструктурной неравномерностью деформации, в свою очередь зависящей от схемы напряженно-деформированного состояния в процессах ХЛШ. Известно, что исчерпание структурной микропластичности предшествует разрушению и разработка способов ее оценки в различных видах холодной штамповки позволит более четко определить запас деформационной пластичности материала на разных стадиях технологического процесса. Унифицированный количественный показатель неравномерности пластической деформации, отражающий потерю устойчивости пластического течения и структурные факторы,

ограничивающие эти свойства, особенно важен при внедрении в производство новых высокопрочных материалов, к которым относятся двухфазные ферритно-мартенситные стали (ДФМС) типа DP600, стали с пластичностью, наведенной превращением типа TRIP700 и микролегированные стали для глубокой вытяжки типа DC06.

Опыт производства сталей повышенной прочности (СПП-сталей) показывает широкое рассеяние пластических характеристик в зависимости от уровня прочности и параметров структуры стали, к которым относятся: размер зерна, а также объемная доля, форма и размеры фаз. Исследования микронеравномерности пластической деформации в процессах одноосного растяжения и влияние на неё структурных параметров однако не позволяют прогнозировать ресурс деформационной пластичности материала в условиях сложнонапряженного состояния, что осложняет выбор и разработку оптимальных режимов деформации.

В связи с этим **целью настоящей работы** является определение взаимосвязи между микроструктурой материала и его деформационным поведением в различных процессах формоизменения. При этом в первую очередь было проанализировано течение материала в процессе гидростатической формовки в сравнении с традиционной формовкой жестким пуансоном и был предложен структурно-чувствительный количественный показатель неравномерности пластической деформации, использующийся при построении диаграмм предельных устойчивых деформаций.

Работа является частью комплекса исследований, проводимых Фрайбергской Горной Академией (Германия) по заказу Немецкого Научного Сообщества (Deutsche Forschungsgemeinschaft) в рамках общего проекта “Исследование изменений микроструктуры высокопрочных сталей в процессах холодной листовой штамповки».

Автор выражает благодарность к.т.н., доц. Цепину М.А., к.т.н., проф. Потемкину В.К. и доктору-инженеру Краузе Г. за помощь, оказанную при выполнении работы.

В диссертационной работе были поставлены следующие **основные задачи**:

1. исследовать структурно-деформационные изменения в СПП-сталях в процессах ХЛШ и закономерности развития их микро- и макропластической неравномерности деформации;
2. разработать показатели количественного определения макро- и микропластической неравномерности деформации в процессах одно- и двухосного напряженного состояния и методику построения диаграмм предельных устойчивых деформаций;
3. методами компьютерного моделирования оценить влияние способа деформации на распределение полей деформаций в микроструктурных составляющих СПП-сталей;
4. использовать показатель неравномерности пластической деформации в процессе комбинированной формовки и гидроформовки с противодавлением жидкостью для определения условий максимального снижения неравномерности деформации в изделии;
5. определить оптимальные технологические режимы деформации СПП-сталей при комбинированной формовке и гидроформовки с противодавлением жидкостью, обеспечивающие минимальную неравномерность деформации по контуру куполообразных изделий.

Новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- всесторонне исследованы и описаны неравномерность микро- и макродеформации при одно- и двухосном напряженном состоянии листовых холоднокатаных СПП-сталей;
- разработан структурно-чувствительный метод определения стадии устойчивой деформации применительно к процессам изготовления тонкостенных осесимметричных оболочек гидроформовкой и формовкой жестким пуансоном;
- разработан и предложен новый метод определения момента потери устойчивости деформации в процессах ХЛШ, применяемый при построении диаграмм предельных устойчивых деформаций

для гарантированного получения качественных изделий при максимальном использовании ресурса деформационной пластичности материала.

Практическая ценность работы заключается:

- в разработке количественных структурно-чувствительных показателей макро- и микропластической неравномерности деформации сталей повышенной прочности;
- в разработке метода определения момента потери устойчивости в процессах ХЛШ листовых материалов по величине показателя неравномерности деформации на диаграмме предельных деформаций, гарантирующего получение качественных деталей;
- в снижении неравномерности деформации по контуру куполообразных изделий и увеличении протяженности стадии устойчивой деформации в процессах комбинированной формовки и гидроформовки с противодавлением жидкостью. Оба процесса формовки рассмотрены с позиций регулирования толщины в конечном изделии;
- полученные в диссертационной работе результаты и разработанные методы построения диаграмм предельных устойчивых деформаций вошли в курс лекций и лабораторных работ по теме «ХЛШ кузовных деталей автомобиля из СПП-сталей» для студентов Фрайбергской Горной Академии по специальности ОМД.

Основные положения, которые выносятся на защиту:

1. закономерности развития макро- и микронеравномерности пластической деформации в процессах ХЛШ;
2. влияние структурно-деформационных характеристик на неравномерность пластической деформации (НПД);
3. оценка ресурса деформационной пластичности материала в процессах ХЛШ по характеристикам стадии устойчивой деформации: показателю неравномерности пластической деформации $A_{нпд}$, индексу анизотропии AI и протяженности второй стадии НПД $\Delta\varepsilon_{i\,max}$;
4. методы построения диаграммы предельных устойчивых дефор-

маций по показателям макро– и микронеравномерной пластической деформации.

Достоверность результатов. Основные научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, обоснованы теоретически и базируются на достоверных экспериментальных данных, полученных с привлечением современных теоретических и экспериментальных методов исследований, данных лабораторных экспериментов, математическом и физическом моделировании с использованием вычислительной и измерительной техники, современного исследовательского оборудования и компьютерного обеспечения.

Апробация работы. Результаты работы доложены и обсуждены на ежегодных конференциях, организуемых Немецким Научным Сообществом в 2002, 2003 и 2004 годах, на 10-ой Международной конференции „Metal Forming 2004“ в Кракове, на Международной научно-технической конференции „Теория и технология процессов пластической деформации – 2004“ в Москве, на Международной конференции „Net-Shape sheet Metal Forming“ в 2005 году в Познани, на 8-ой Международной конференции „International Conference on Technology of Plasticity 2005“ в Вероне и научных семинарах института «Institut für Metallformung» Фрайбергской Горной Академии 2003-2005 года.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликованы 11 печатных работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, общих выводов и приложения. Работа содержит 187 страниц машинописного текста, 131 рисунок, 31 таблицу и список литературы из 186 наименований.

Содержание работы

В первой главе проведен анализ современного состояния по вопросам влияния микроструктуры материала на его деформационно-прочностные характеристики. Показано, что существующий материаловедческий подход в вопросах технологической пластичности рассматривает, в основном, влияние количественных характеристик структуры:

ее линейных размеров, удельного объемного содержания фаз (в т.ч. в процессах метастабильных превращений), химического состава и текстуры на механические свойства материала (пределы текучести $\sigma_{0,2}$ и прочности $\sigma_В$, отношение $\sigma_{0,2}/\sigma_В$, общее $\delta_{общ}$ и равномерное $\delta_{равн}$ удлинение, показатель упрочнения $n = \partial\sigma/\partial\varepsilon$, коэффициент нормальной анизотропии R) в условиях одноосного растяжения и сложного напряженно-деформированного состояния (т.н. технологических пробах). Несмотря на значительные успехи, достигнутые в изучении НПД в процессах ХЛШ (работы Горелика С.С., Гуляева А.П., Одинга И.А., Ивановой В.С., Томленова А.Д., Павлова И.М., Пашкова П.О., Гурьева А.В., Боаса В., Чечулина Б.Б., Головлева В.Д., Гешелина В.Г., Богачевой А.В., Узлова И.Г., Гайдука В.В., Бирёгеля Ц., Грельмана В. и др.), имеется целый ряд нерешенных вопросов по определению характеристик предельной пластичности и сопротивления разрушению сталей. Отмечая развитие макронеоднородности пластической деформации как процесса, сопутствующего пластическому формоизменению деформируемого образца, как правило, не рассматриваются структурные факторы, ограничивающие сам процесс и влияющие на распределение полей деформаций в материале. В тоже время способы повышения технологической пластичности и сопротивления разрушению направлены в первую очередь на структурные средства управления процессами устойчивости течения и сопротивления образованию и развитию трещины.

Все возможные способы деформирования образца до разрушения нашли отражение в построении диаграмм предельных деформаций (ДПД или в зарубежной литературе - FLD). Однако их использование не дает полной гарантии качества изделий в рассматриваемых технологических процессах, т.к. последние (ДПД-диаграммы) не отражают динамику изменения ресурса деформационной пластичности материала. Предлагаемые технологам диаграммы предельных деформаций изменяются в зависимости от разброса (в пределах ГОСТов) химического состава сплава, вида полуфабриката, изменений микроструктуры и предыстории нагружения и т.о. становятся малоэф-

фективными на стадии разработки технологического процесса и выбора материала под конкретное изделие. Известно также, что момент потери устойчивости течения не всегда задан диаграммой деформации (для одноосного растяжения $\delta_{равн} = n$) и потеря устойчивости течения может происходить раньше, чем должно быть по традиционному механизму. В связи с этим оценка запаса деформационной пластичности, а также определение влияния структуры на устойчивость течения и сопротивление разрушению требует использования комплексного подхода, сочетающего анализ ДПД и прямых методов наблюдения за структурой (in situ-метод), текстурой и разрушением (анализ строения изломов) в процессе деформации. Определение характеристик предельной пластичности на микроструктурном уровне предполагает также проведение анализа микронеравномерной деформации, нарушающей устойчивость пластического течения в процессах ХЛШ.

На основании обзора литературных данных сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе приведено описание материалов и методик исследования.

Материалом исследования служили тонколистовые холоднокатаные стали повышенной прочности DP600 и TRIP700 толщиной 1,2 мм, поставляемые заводом-изготовителем Thyssen Krupp Stahl AG соответственно по стандартам SEW 097-1 и SEW 097-2, а также микролегированная тонколистовая холоднокатаная сталь для глубокой вытяжки DC06 толщиной 1,0 мм, поставляемая также Thyssen Krupp Stahl AG по SEW 095. Разнообразие их микростроения (от чисто ферритной стали DC06 до ферритно-бейнитной с остаточным аустенитом TRIP700), а также применение современных методов исследования позволило определить взаимосвязь между течением материала и изменением его структуры.

Наряду со стандартными механическими характеристиками: пределом текучести $\sigma_{0,2}$, временным сопротивлением разрушению σ_B, относительным удлинением до разрушения $\delta_{общ}$, определенными на стандарт-

ных разрывных образцах в 3-х направлениях (0, 45 и 90 град.) относительно направления прокатки при скорости движения траверсы 2-5 мм/мин, на тех же образцах по специальным методикам определяли показатель деформационного упрочнения n, коэффициент нормальной пластической анизотропии R, а также неравномерность пластической деформации на макро- ($А_{нпд}$) и микроуровне (AI).

Изучение НПД путем определения распределения деформаций по длине образца (контуру детали) на различных стадиях деформации проводили: при одноосном растяжении – на стандартных листовых образцах; при 2-х осном растяжении – на круглых листовых образцах методом гидростатической формовки и формовки механическим пуансоном с жестким прижимом фланца до момента трещинно-образования заготовки на установке для листовой формовки BUP600 фирмы Roell Amsler. Диаметр матрицы при формовке жестким пуансоном и жидкостью составил 64 мм при диаметре пуансона со сферической головкой 60 мм. Использование различных смазок позволило при формовке жестким пуансоном регулировать изменение коэффициента трения в интервале 0,05 до 0,35.

Макронеравномерность пластической деформации образцов при одно- и 2-х осном напряженном состоянии в процессах ХЛШ оценивалась по показателю неравномерности пластической деформации $А_{нпд}$, принятому за основной количественный критерий, характеризующий деформационную неоднородность листовой стали.

Величина $А_{нпд}$ представляет отношение размаха варьирования интенсивности деформации отдельных участков по длине образца или образующей контура изделия при ступенчатом нагружении к среднему арифметическому значению интенсивности деформации на данной ступени нагружения:

$$А_{НПД} = \frac{\varepsilon_{i\ max} - \varepsilon_{i\ min}}{\varepsilon_{i\ ср}} \qquad (1)$$

где $\varepsilon_{i\ max}$, $\varepsilon_{i\ min}$ - максимальная и минимальная интенсивность деформации отдельных участков по длине образца или образующей контура изделия на данной ступени нагружения;

$\varepsilon_{i\,ср}$ - интенсивность деформации образца, равная среднему арифметическому значению на данной ступени нагружения.

Числитель в уравнении (1) - ($\varepsilon_{i\,max}$–$\varepsilon_{i\,min}$) - определяет диапазон изменения пластической деформации отдельных участков по длине образца или образующей контура изделия на каждой ступени нагружения. В таком виде показатель $А_{нпд}$ характеризует относительную величину неравномерности распределения пластической деформации в отдельных объемах деформируемого металла или амплитуду изменения интенсивности деформации в отдельных (локальных) участках при одно- и 2-х осном НДС по сравнению со средней интенсивностью деформации данного образца. Чем меньше значение $А_{нпд}$, тем более равномерным будет распределение полей деформаций.

С использованием метода координатных сеток на каждой ступени нагружения по длине образца или образующей контура изделия определялись главные логарифмические деформации ε_1 и ε_2. Замер сетки с исходным размером ячейки 1×1 мм производился с помощью установки для оптического автоматического распознавания растра AutoGrid® фирмы Vialux.

Деформированное состояние в различных участках заготовки оценивали по величине интенсивности деформации из уравнения Мизеса:

$$\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 + \varepsilon_2^2}\ . \qquad (2)$$

Из полученных данных выбирали $\varepsilon_{i\,max}$, $\varepsilon_{i\,min}$ и рассчитали $\varepsilon_{i\,ср}$.

Диаграмму предельных деформаций, имеющую большое практическое значение для прогнозирования разрушения в различных технологических операциях листовой штамповки, строили по результатам комплексных испытаний специальных листовых образцов в координатах главных логарифмических деформаций в плоскости листа ε_1 и ε_2 ($\varepsilon_1 > \varepsilon_2$) по методике Накасимы.

Металлографические исследования имели целью идентификацию структурных составляющих для измерения стереологических характеристик, однозначно описывающих параметры структуры (форму и размер) и их изменение в процессе деформации. Исследования

микроструктуры сталей проводили методами световой и растровой электронной микроскопии.

Метод оптической микроскопии на световом микроскопе Neophot 30 с программой Image C использовали для количественных замеров структурных составляющих и их угловой ориентации на традиционно изготовленных и подтравленных в 5%-ном растворе соляной кислоты шлифах. Микроструктуру исследовали в плоскости прокатки и в перпендикулярных к ней направлениях с увеличениями ×400-600. Определение количественных структурных характеристик (средней хорды зерна, изменения угла разориентировки зерен и т.д.) осуществляли с помощью программы Image C, позволяющей обрабатывать фотографии структуры.

Растровая электронная микроскопия на приборе фирмы LEO 1530 применялась при структурных, микрорентгеноспектральных и микрофрактографических исследованиях.

In situ-метод использовали для прямого наблюдения за микроструктурой в испытаниях на одноосное растяжение непосредственно в колонне растрового электронного микроскопа на специальных образцах-шлифах с рабочей длиной 10 мм.

Текстурные исследования методом электронной дифракции обратно-отраженных электронов (EBSD) с пакетом программ Channel 5 проводили в центральной части поперечного сечения (по толщине) образца с минимальным размером области обсчета 100×180 мкм.

Весь комплекс проведенных исследований позволил определить на разных стадиях деформации:

1. величину логарифмической деформации ферритной ε^{Φ} и мартенситной ε^{M} компонент микроструктуры вдоль и поперек направления прокатки;
2. величину угловой компоненты деформации по относительной частоте границ зерен ω, повернутых в направлении прикладываемой нагрузки;
3. индекс анизотропии деформирования зерен AI;
4. локальный химический состав элементов структуры;

5. преимущественную кристаллографическую ориентировку.

Результаты исследований по кинетике образования и развитию очагов локальной структурной НПД во всех рассмотренных способах деформации использовали в компьютерном моделировании процесса разрушения двухфазной стали DP600 методом конечных элементов с пакетом программ ANSYS.

В третьей главе приводятся результаты экспериментальных исследований предельного формоизменения в процессах формовки гидростатическим давлением и механическим пуансоном осесимметричных куполообразных изделий из листовых холоднокатаных сталей DP600, TRIP700 и DC06.

Представлено описание изменения энергосиловых параметров процессов и геометрических размеров заготовки во времени применительно к исследуемым сталям. Подробно рассмотрены стадии формообразования оболочки. Изучен характер распределения полей интенсивности деформаций по контуру изделий, что позволило оценить анизотропию деформации на разных этапах процесса формовки. Для исследуемых процессов формовки построены графики зависимости показателя неравномерности пластической деформации от относительной высоты формуемого изделия: $A_{нпд} = f(H/a)$. Во всех рассмотренных случаях зависимость носит ярко выраженный неравномерный характер. При этом минимальная неравномерность деформации при гидроформовке наблюдается в интервале высот $H/a = 0{,}25\text{-}0{,}6$, в то время как при формовке жестким пуансоном с полужидкой смазкой солидолом минимальная неравномерность деформации сдвигается в сторону больших относительных высот ($H/a = 0{,}48\text{-}0{,}73$). Показатель $A_{нпд}$ в этом случае увеличивается по абсолютной величине в 1,2-1,65 раза, значительно уменьшая стадию устойчивой деформации, что характеризует процесс формовки жестким пуансоном как более неравномерный с точки зрения распределения деформаций по контуру изделий.

В четвертой главе обсуждаются закономерности деформации микроструктурных составляющих, приводящие к макро- и микронеравномерной деформации холоднокатаных сталей в процессах одноосного и двухосного растяжения. Установлено, что максимальная неравномерность при одноосном растяжении присуща поперечному направлению стали DP600 с $К_{вар}$ = 0,85, а минимальная - долевым образцам стали DC06 с $К_{вар}$ = 0,73. Для листов стали TRIP700 с вырезкой 0, 45 и 90 град. к направлению прокатки величина $К_{вар}$ соответственно равна 0,79, 0,82 и 0,83.

Результаты измерений локальных деформаций в in situ испытаниях показывают, что максимальная неравномерность отдельных всплесков деформации вдоль реперной линии превышает ее среднее значение (10%) для стали DP600 на 4%, для стали TRIP700 на 3,8% и для стали DC06 на 2%.

Распределение пластической деформации по локальным микро- и макрообъемам разрывного образца при кажущейся хаотичности этого процесса обладает весьма строгими закономерностями: порядок распределения деформации по отдельным участкам образца, устанавливающийся уже на начальной стадии пластического течения металла, сохраняется в ходе всего последующего деформирования. Установлена 3-х стадийность и подобие характера распределения показателя макро- (стандартные испытания) и микро- (in situ) неравномерности пластической деформации в процессе одноосного растяжения.

В процессах ХЛШ тонколистовых холоднокатаных сталей развитие макропластической неравномерности зависит от схемы деформации и происходит также в 3 стадии: высокая исходная неравномерность материала на первой стадии деформации ($\varepsilon_{i\,max} \leq$ 0,05-0,3) снижается и стабилизируется к началу второй стадии устойчивой деформации ($\varepsilon_{i\,max}$ = 0,05-0,68), заканчивающейся моментом потери устойчивости. На стадии устойчивой деформации в СПП-сталях уровень значений показателя $А_{нпд}$ более чем в 7 раз при гидроформовке и в 9 раз при формовке пуансоном превышает аналогичные значения в процессе

одноосного растяжения. Ускоренный рост неравномерности пластической деформации на третьей стадии в сталях повышенной прочности отражает необратимые микроструктурные изменения, происходящие в процессах формовки жестким пуансоном и при одноосном растяжении. Представляющие большой практический интерес две последние стадии деформации (их длительность, значения и монотонность изменения $A_{нпд}$) зависят от структуры материала и от условий деформирования. Полученные результаты указывают на наличие прямой взаимосвязи между НПД и линейной, а также угловой компонентами деформации отдельных структурных составляющих, которые в свою очередь определяют микронеравномерность ПД. При этом:

а) чем больше угловая компонента деформации, тем больше протяженность стадии устойчивой деформации;

б) в момент потери устойчивости при одноосном растяжении и формовке жестким пуансоном дробление (разрушение) мартенситной составляющей структуры сопровождается резким увеличением показателей $A_{нпд}$, AI и ω, после чего процесс разрушения материала происходит путем трещинообразования по границам фаз. Дробление мартенситных пачек, прежде всего тех из них, которые ориентированы вдоль направления приложения нагрузки, также приводит к зарождению микротрещин;

в) сильное доминирование угловой компоненты деформации структуры, наблюдаемое в процессе гидравлической формовки, препятствует разрушению мартенситных пачек. Процесс трещинообразования происходит исключительно на границе фаз. Гидроформовка СПП-сталей в 1,5 раза увеличивает значения показателя ω по сравнению с одноосным растяжением и в 3-4 раза продолжительность стадии устойчивой деформации;

г) на характер второй стадии НПД оказывает влияние способ нагружения. Так при гидравлической формовке с противодавлением момент потери устойчивости смещается в сторону больших деформаций.

На основании проведенных экспериментов предложены количественные структурно-чувствительные показатели макро- ($A_{нпд}$) и микро- (AI) неравномерности пластической деформации и методы их расчета.

Компьютерным моделированием процессов деформации (одноосное растяжение и гидроформовка) 2-х фазной стали DP600 установлено распределение полей деформаций и роль межфазных границ как центров локализации НПД. Полученный алгоритм деформации выявил роль мартенситной составляющей в общей схеме разрушения. Установлено, что при гидроформовке реализуется схема нагружения с низкими значениями НПД на межфазных границах в СПП-сталях.

Излом, отражая последовательность протекания процесса разрушения, позволяет локально оценить неравномерность деформации в зависимости от структуры материала. Локализация деформации около включений проявляет себя в изломе СПП-сталей в виде неглубоких равноосных ямок и высоких значений НПД, а локальная неоднородность на его поверхности - в виде отдельных вторичных микротрещин. Высокая степень микронеоднородности излома и его высокая макрошероховатость в формованных пуансоном куполах свидетельствуют о непродолжительной третьей стадии деформации и высоких значениях НПД. Результаты микрофрактографического исследования процессов гидроформовки и формовки жестким пуансоном свидетельствуют о различиях в формировании строения изломов, вызванных, вероятно, разницей механизмов потери устойчивости. Множественное вторичное растрескивание и глубокие шевроны в изломах куполов при формовке пуансоном свидетельствуют о влиянии текстурной и структурной анизотропии, менее проявляющейся в процессе гидроформовки.

Текстурные изменения в холоднокатаной листовой стали в процессах одно- и двухосного напряженного состояния определялись из анализа полюсной плотности кристаллографических ориентировок (ODF) в направлении [110] для плоскостей (001), (112), (111), (110); для плоскости (111) и направлений [011], [112]; а также в направлении [100] по плоскостям (001) и (100), соответственно для α-, γ- и η-волокон.

Установлено, что в СПП-сталях последовательная смена стадий НПД на диаграмме $A_{нпд} = f(\varepsilon_{i\,max})$ связана с изменением ODF и, в первую очередь, вдоль α- и γ-волокон. Момент потери устойчивости в процессах одноосного растяжения и формовки пуансоном характеризуется текстурой, содержащей два основных компонента (111)[110] с ODF > 8. Процесс гидравлической формовки СПП-сталей характеризуется смещением максимума плотности к кристаллографической ориентировке (112)[110] по α-волокну, что сопровождается увеличением стадии устойчивой деформации.

В пятой главе рассматривается построение диаграммы предельных устойчивых деформаций (ДПУД) тонколистовых холоднокатаных сталей по результатам исследования макро- ($A_{нпд}$) и микро- (AI) неравномерности пластической деформации. Оба рассматриваемых структурно-чувствительных показателя характеризуются стабильностью значений на стадии устойчивой деформации. Точка перегиба, т.е. переход из 2-го в 3-ий участок кривой $A_{нпд} = f(\varepsilon_{i\,max})$ предшествует моменту "шейкообразования", что было установлено нами в процессах одноосного и двухосного растяжения, где максимальная интенсивность деформации в точке перегиба соответствует усилию нагружения $(0{,}91\text{-}0{,}96)\cdot P_{max}$ на диаграмме $P/P_{max} = f(\varepsilon_{i\,max})$. При этом показатель неравномерности деформации имеет минимальное значение.

Технологические факторы, формирующие микроструктуру, а также определяющие способность материала к устойчивому течению без локализации деформации, нашли отражение в построении ДПУД. По величине максимальной интенсивности деформации в момент перехода второй стадии в третью рассчитываются величины главных компонент деформаций ε_1 и ε_2. По этим значениям, соответствующим моменту потери устойчивости, по аналогии с диаграммой ДПД, строится диаграмма предельных устойчивых деформаций.

Построение ДПУД по индексу анизотропии AI осуществляется по аналогичной методике определения перехода кривой $AI = f(\varepsilon_{i\,max})$ из второй зоны в третью.

Полная диаграмма предельных деформаций (ДПД), дополненная диаграммой предельных устойчивых деформаций (ДПУД), позволяет использовать их при разработке технологических процессов ХЛШ для оценки предельного формоизменения листовой заготовки с точки зрения устойчивости и разрушения материала, что гарантирует получение качественных изделий.

В шестой главе на базе разработанных диаграмм деформаций (ДПД и ДПУД) подробно рассматриваются 2 способа регулирования толщины при формовке листовых заготовок: комбинированная формовка (КФ), представляющая из себя процесс двухстадийного деформирования тонкостенных изделий последовательным действием жесткого и жидкостного пуансонов (или их действием в обратной последовательности) и так называемый гидроформ-процесс, где кроме рабочего давления жидкости $p_{осн}$ со стороны пуансона используется жидкостное противодавление $p_{пд}$ со стороны матрицы. При этом $p_{пд} < p_{осн}$.

В настоящей работе гидроформ-процесс изучали с использованием двух уровней противодавления:

1. противодавление составляло одну четверть от рабочего давления ($p_{пд} = ¼p_{осн}$);
2. противодавление было равно половине рабочего давления ($p_{пд} = ½p_{осн}$).

Установлено, что противодавление оказывает благоприятное воздействие на уровень и характер изменения НПД по поверхности формуемых деталей, способствует достижению более равномерного распределения максимальных деформаций по контуру изделия по сравнению с “чистой” гидроформовкой. Их значительное возрастание к моменту разрушения характеризует увеличение пластичности материала при использовании данной схемы нагружения.

Наиболее эффективной, с точки зрения получения равнотолщинных деталей, как показывают проведенные исследования для всех исследуемых сталей, является величина противодавления, равная $p_{пд} = ½p_{осн}$. Гидроформовка с противодавлением позволяет снизить

неравномерность деформации вдоль образующих куполов из стали TRIP700, DP600 и DC06 по сравнению с “чистой” гидроформовкой в 1,3-1,5 раза.

Для процесса комбинированной формовки распределение интенсивности деформации по контуру изделия, характер и абсолютные значения показателя $А_{нпд}$ существенно зависят от относительной высоты в момент изменения способа деформации. Чем меньше относительная высота перехода $(H/a)_{пер.}$ от одного способа деформации к другому, тем больше абсолютное значение показателя $А_{нпд}$ в конечном изделии. Так для первого варианта КФ СПП-сталей при переходе $(H/a)_{пер.} = 0,41$ от гидроформовки к формовке жестким пуансоном показатель $А_{нпд}$ на последующих стадиях деформации с 0,95 увеличивается до 1,12. Дальнейшее увеличение высоты перехода способствует снижению неравномерности деформации: при $(H/a)_{пер.} = 0,5$ – $А_{нпд} = 1,08$, а при $(H/a)_{пер.} = 0,59$ – $А_{нпд} = 1,0$. То есть, чем выше $(H/a)_{пер.}$ от одного способа деформации к другому, тем меньше неравномерность деформации.

Для второго варианта КФ снижение относительной высоты перехода от деформации жестким пуансоном к деформации жидкостью приводит к увеличению деформации в центральной зоне купола и увеличению значений показателя $А_{нпд}$. При этом снижение неравномерности деформации прямо пропорционально относительной высоте детали, отформованной на 1-ом переходе жестким пуансоном. Переход от жесткого пуансона к гидроформовке на последних стадиях устойчивой деформации способствует максимальному выравниванию неравномерности деформации в куполе в интервале относительных высот 0,6-0,78.

Таким образом, при изучении рассматриваемых способов регулирования толщины:

а) исследованы поля неравномерности деформаций тонких оболочек при больших пластических деформациях;

б) изучен диапазон возможного уменьшения неравномерности деформации по контуру изделия путем варьирования на стадии устойчивой деформации технологическими параметрами процесса формовки:

- значением величины жидкостного противодавления;
- моментом перехода от одного способа деформации к другому.

Исследование гидроформ-процесса куполообразных деталей из листовых заготовок СПП-сталей и процесса комбинированной формовки по схемам: “формовка жестким пуансоном+гидроформовка” и “гидроформовка+формовка жестким пуансоном” показало возможность снижения неравномерности пластической деформации по контуру формуемой детали. Полученные результаты свидетельствуют об уменьшении разнотолщинности в формуемых изделиях и повышении уровня деформации к моменту разрушения. В результате проведенных исследований установлено, что в случае комбинированной формовки по схеме “формовка жестким пуансоном+гидроформовка” с относительной высотой перехода H/a = 0,50-0,59 и гидроформ-процесса с $p_{пд} = ½p_{осн}$ достигается значительное (в 1,3-2,4 раза) снижение неравномерности деформации.

Основные результаты и выводы

1. В результате исследований структурно-деформационных изменений в высокопрочных сталях DP600 и TRIP700, а также в стали DC06 в процессах ХЛШ установлено, что пластическая деформация, протекающая в макро- и микрообъемах образца, крайне неравномерна и ее распределение, установившееся на начальной стадии пластического течения металла, сохраняется в процессе последующего деформирования.
2. Проведенные исследования позволили выявить трехстадийность протекания неравномерности пластической деформации в исследованных процессах формовки, при которой снижение исходной НПД на 1-ой стадии ведет к стабилизации процесса на стадии устойчивой деформации, переходящей в стадию ее ускоренного роста. Представляющие большой практический интерес две последние стадии деформации (их длительность, абсолютные значения и монотонность изменения НПД) зависят от структуры

материала и условий деформирования. При этом установлена прямая взаимосвязь НПД с линейной и угловой компонентами деформации. Так:

а) чем больше угловая компонента деформации, тем больше протяженность стадии устойчивой деформации;

б) резкое увеличение показателя угловой компоненты деформации ω является критерием достижения момента потери устойчивости течения, сопровождающегося формированием и развитием межфазных микротрещин, предшествующих окончательному разрушению материала.

3. В результате исследований структурных изменений выявлено, что в мартенситсодержащих сталях момент потери устойчивости в процессе формовки жестким пуансоном и одноосного растяжения характеризуется разрушением и дроблением мартенситных пачек, а также количественным изменением полюсной плотности кристаллографических ориентировок (ODF) вдоль α– и γ-волокон. При этом процесс гидроформовки, реализующийся в условиях минимальных значений НПД, не приводящих к разрушению мартенситной фазы, характеризуется увеличением длительности стадии устойчивой деформации, а также ростом ODF вдоль α-волокна.
4. На основе проведенных исследований разработаны показатели количественной оценки макро- ($A_{нпд}$) и микропластической (AI) неравномерности деформации в процессах одно- и двухосного напряженного состояния, а также методика построения диаграмм предельных устойчивых деформаций (ДПУД), позволяющие эффективно использовать запас деформационной пластичности материала в том числе при разработке сложных комбинированных технологических процессов ХЛШ.
5. Методами компьютерного моделирования проанализировано деформационное поведение различных структурных составляющих в СПП-сталях при одноосном и двухосном (гидроформовка) напряженном состоянии. Компьютерное моделирование микро-

структурных деформаций показало хорошую сходимость с результатами in situ растяжения, а также позволило разработать алгоритм деформации для процесса гидроформовки с низкими значениями НПД на межфазных границах. Установлено влияние схемы НДС на распределение полей деформаций в структурных составляющих, а также показана роль межфазных границ и мартенситной составляющей как центров локализации НПД.

6. Результаты проведенных исследований НПД в процессах ХЛШ легли в основу выбора технологических параметров для процессов комбинированной формовки (формовка жестким пуансоном + гидроформовка) и гидроформ-процесса (гидроформовка с противодавлением жидкостью) тонких оболочек из СПП-сталей. Изменения величины жидкостного противодавления и момента (относительной высоты купола) перехода от одного способа деформации к другому на стадии устойчивой деформации позволили существенно снизить НПД в изделии (в 1,3-1,5 раза по сравнению с «чистой» гидроформовкой и в 1,3-2,4 раза по сравнению с формовкой жестким пуансоном).

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Кавалла Р., Гук С.В., Смирнов О.М. Исследование течения материала при холодной деформации тонколистовых сталей. В сб. «Теория и технология процессов пластической деформации-2004». Труды международной научно-технической конференции. М., 2004, с.144-146.
2. Кавалла Р., Гук С.В., Пуш Г., Потемкин В.К. Исследование деформации холодно-листовых сталей методом «IN SITU». В сб. «Теория и технология процессов пластической деформации-2004». Труды международной научно-технической конференции. М., 2004, с.34-35.

3. Kawalla R., Guk S. Untersuchung der Wechselwirkung von Werkstoffeigenschaften und Prozess bei der Blechumformung mit Wirkmedien. 2. Kolloquium „Wirkmedienbasierte Fertigungstechniken zur Blechumformung“ im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms SPP 1098, 11. Dezember 2002 in Dortmund. ISBN 3-00-010890-4, S.138-147.
4. Kawalla R., Guk S. Untersuchung der Wechselwirkung von Werkstoffeigenschaften und Prozess während der Hydroblech-umformung mit Wirkmedien. 3. Kolloquium „Wirkmedienbasierte Fertigungstechniken zur Blechumformung“ im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms SPP 1098, 10. Dezember 2003 in Stuttgart. ISBN 3-9809535-0-5, S.75-84.
5. Kawalla R., Guk S. Peculiarity of the interaction of material properties and deformation conditions during sheet hydroforming. Proceedings of the 10th International Conference on Metal Forming in Kraków 2004. GRIPS’ Sparkling World of Steel Vol.1: Proceedings, No.3. ISBN 3-937057-08-0, p.209-214.
6. Guk S., Krause G., Kawalla R. Interaction of material properties and deformation conditions during sheet forming processes: microstructure strain localization. Proceedings of the international conference “Net-Shape sheet Metal Forming” in Poznan 2005. ISBN 83-911809-4-8, p.1-7.
7. Guk S., Kawalla R. Microstructure strain localization during sheet metal hydroforming processes. Steel Research International 76, Nr.12, 2005, p.843-851.
8. Kawalla R., Guk S. Special features of the interaction between material properties and deformation conditions during sheet forming processes: microstructure strain localization. Proceedings of the 8th International Conference on Technology of Plasticity in Verona, Oktober 2005, p.23-31.
9. Гук С.В., Смирнов О.М., Кавалла Р. Микроструктурная неравномерность деформации многофазных сталей при оценке

предельного формоизменения листового металла. Металлург №3, 2006.

10. Гук С.В., Смирнов О.М., Кавалла Р. Оценка предельного формоизменения тонколистовой стали при осесимметричной штамповке. Кузнечно-штамповочное производство №5, 2006.
11. Гук С.В., Смирнов О.М., Кавалла Р. Штампуемость тонколистовой стали при осесимметричной гидроформовке с противодавлением жидкостью. Металлург №5, 2006.

С. Гук