

Тема: Штампуемость листового материала, методы оценки штампуемости (2 часа)

План лекции

1. Понятие штампуемости
2. Методы оценки штампуемости

1. Понятие штампуемости

Для изготовления различных деталей требуется металл с высокими пластическими свойствами. Основным показателем пригодности металла, предназначенного для изготовления холодноштампованных деталей, — его технологическая деформируемость, характеризующая способность металла изменять свою форму при обработке давлением без нарушения сплошности.

Технологическая деформируемость включает понятия «**штампуемость**» и «**допустимое формоизменение**». **Штампуемость** — сравнительная обобщенная характеристика, отражающая поведение листового металла при штамповке в производственных условиях, его способность пластически деформироваться по заданной схеме, до заданных степеней деформации и приобретать требуемую форму в процессе технологической операции или перехода. **Штампуемость** зависит от качества и физического состояния металла, а именно: химического состава, характеристик прочности, пластичности, анизотропии, размеров зерна и структурного состояния, объема неметаллических включений, склонности металла к деформационному старению, микрогеометрии поверхности листового проката, наличия внешних и внутренних дефектов и пр.

Допустимое формоизменение зависит не только от штампуемости, но и от условий штамповки, относительных размеров и формы детали, ее технологичности, содержания технологического процесса, сил контактного трения, конструкции штампов и их технического состояния, зазоров между рабочим инструментом, применяемого оборудования и пр. Допустимое формоизменение зависит также от вида напряженно-деформированного состояния зоны пластической деформации штампуемой детали. Чем больше сжимающие напряжения в зоне деформации, тем больше предельно возможное формоизменение металла. **Технологическая деформируемость** — понятие собирательное, определяемое системой: металл—конструкция детали—технология штамповки—штампы—оборудование.

При хорошей технологической деформируемости производственный процесс протекает стабильно, отсутствует брак, качество деталей высокое.

Существующие методы оценки штампуемости металла подразделяются на физико-химические, механические и технологические испытания (пробы), статистические и экспериментально-расчетные. Все перечисленные методы служат, в основном, для установления соответствия качества металла требованиям стандартов по химическому составу, механическим свойствам, его структуре и пр.

Оценке штампуемости металлопроката предшествует наружный осмотр и контроль его размеров в соответствии с требованиями стандартов. Для проверки качества проката от партии отбирают два листа или один рулон. Листовой прокат должен быть обрезан со всех сторон, для рулонного проката допускается катаная кромка. На обрезных кромках не должно быть расслоений и торцовых трещин. Дефекты глубиной, превышающей половину предельного отклонения по ширине листа, недопустимы. Прокат в рулонах не должен иметь кромок, изогнутых под углом 90° и более, а также скрученных и смятых концов. Длина конца рулона неполной ширины не должна превышать ширины рулона. Поверхность проката должна быть без плен, пузырей-вздутий, вкатанных металлических частиц, раскатанных загрязнений и надрывов. Расслоение металла недопустимо. Листы и рулоны должны быть смазаны тонким слоем нейтрального смазочного вещества. Номинальные размеры и предельные отклонения по длине, ширине и толщине проката должны удовлетворять требованиям ГОСТ 19903—84 и ГОСТ 19904—84.

Методы оценки штампуемости

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Физико-химические испытания металла включают *химический анализ* и *металлографические исследования*.

С помощью химического анализа устанавливают соответствие химического состава металла требованиям стандартов. Кроме того, химический анализ в сочетании с данными других видов испытаний помогает выявить причины брака при штамповке. Допустимая массовая доля основных химических элементов и их влияние на штампуемость листовой стали указаны в табл. 2.

С помощью металлографических исследований определяют размер зерна феррита, объем неметаллических включений и структурное состояние металла. Оптимальный размер зерна зависит от формы штампуемой детали, толщины заготовки, степени деформации и ряда других факторов. При чрезмерно большом зерне штампуемость металла снижается. Кроме того, крупное зерно вызывает после штамповки появление шероховатой поверхности (апельсиновой корки) на деформированных участках детали, которая портит внешний вид. Увеличенное зерно приводит к разрывам детали при глубокой вытяжке.

С уменьшением размеров зерен по сравнению с оптимальными возрастает сопротивление деформированию, увеличиваются упругие деформации, существенно влияющие на точность размеров штампованных деталей, повышается износ рабочих поверхностей пуансонов и матриц.

Допускаемая массовая доля основных химических элементов листо-

вых углеродистых качественных сталей 08—20, их влияние на штампуемость (по ГОСТ 1050—84)

Химический элемент	Допускаемая массовая доля, %	Характер влияния на штампуемость стали
Углерод	0,05—0,24	Увеличивает прочностные характеристики при одновременном уменьшении пластичности
Кремний	0,03—0,37	Повышает прочность, твердость и упругость (пружинение) стали
Марганец	0,25—0,65	Упрочняет сталь, связывает серу в сульфиды марганца и этим предупреждает образование сульфида железа, ухудшающего штампуемость
Хром Никель	0,10-0,25 } до 0,25 }	Способствует повышению прочности при почти неизменной пластичности; при повышенном содержании — пластичность стали снижается
Сера	До 0,04	Вызывает хрупкость, способствует образованию трещин при вырубке, гибке, отбортовке и пр.
Фосфор	До 0,035	Вызывает интенсивное упрочнение в процессе штамповки, повышает склонность к старению

Для относительной оценки размеров зерен существует специальная методика, регламентированная ГОСТ 5639—82, согласно которой размеры зерен определяются под микроскопом при увеличении в 100 раз. Зерна, видимые под микроскопом, сравнивают с эталонными изображениями, имеющимися в стандарте. Размеры зерен определяют по баллам. Крупнозернистая структура стали соответствует 1—3 баллам, мелкозернистая 8—10 баллам. Если в структуре металла явно преобладают два основных размера зерен, то их обозначают двумя номерами, например, № 3—8.

Большое влияние на штампуемость металла оказывает неравномерность размеров зерен (так называемая разнотернистость). Допустимая степень деформации при вытяжке деталей из металла с неравномерным зерном снижается. Это происходит вследствие того, что в крупных зернах металла торможение движения дислокаций и упрочнение за счет влияния границ незначительно, поэтому возможна большая степень деформации, в то время как мелкие зерна деформируются значительно меньше. В результате неравномерной деформации зерен металла при штамповке могут появляться трещины и разрывы. В связи с этим применение листовой стали со смешанным (пестрым) зерном для выполнения формоизменяющих операций листовой штамповки нецелесообразно.

В сталях, предназначенных для холодной штамповки, неравномерность размеров зерен допускается в пределах двух-трех смежных номеров зерен феррита (ГОСТ 16523—70). При штамповке деталей сложной формы зерно феррита должно соответствовать № 6—9, при холодной штамповке объемных деталей — № 6—8.

Неметаллические включения образуются вследствие проникновения в металл серы из топлива и руды (FeS и MnS), избытка кислорода в металле в виде FeO и Al_2O_3 и взаимодействия оксида кремния SiO_2 и оксида железа (II) — FeO .

Неметаллические включения располагаются по границам зерен металла и этим существенно снижают его штампуемость, в связи с чем массовая доля неметаллических включений регламентирована ГОСТ 16523—70, а методы их определения ГОСТ 1778—70. Чем меньше массовая доля неметаллических включений, тем штампуемость металла выше.

Структурное состояние. Штампуемость листового металла существенно зависит не только от содержания углерода, но и от его структурного состояния, включений цементита и строения перлита.

Основное влияние на штампуемость стали оказывает цементит (Fe_3C). Включения структурно-свободного цементита вызывают разрывы листовой стали при холодной штамповке. Частицы чрезвычайно твердого и хрупкого цементита, разламываясь на более мелкие, образуют трещины, распространяющиеся далее в феррите. В сталях марок 08кп и 10кп присутствие цементита в виде крупных включений по границам зерен феррита оказывает отрицательное влияние и может привести к браку по разрывам. Мелкие включения цементита, входящие в состав перлита, значительно снижают отрицательное его влияние.

Содержание включений структурно-свободного цементита в стали оценивают шестибальной (0—5) шкалой согласно ГОСТ 5640—68 в зависимости от числа, протяженности, формы и расположения его частиц.

Допустимое содержание структурно-свободного цементита в сталях для холодной штамповки зависит от марки стали и категории сложности штампуемых деталей. **Например**, при штамповке автокузовных деталей, сложной формы из листовой стали 08Ю категории ОСВ содержание структурно-свободного цементита должно быть не выше, чем 2-го балла.

При изготовлении деталей из листовой стали хорошая штампуемость наблюдается, если металл имеет структуру мелкозернистого феррита и феррита с перлитом, располагающегося в стыках зерен. При изготовлении деталей из сортового проката хорошей штампуемостью характеризуются стали, имеющие структуру зернистого перлита (или сфероидального цементита). Для сталей с содержанием углерода более 0,25 % оптимальной структурой считается сорбитообразный перлит.

Существенное влияние на штампуемость металла оказывает *полосчатость* микроструктуры, которая характеризуется определенной ориентировкой вытянутых в результате пластической деформации зерен феррита. Полосчатость ферритоперлитной структуры оценивается по шестибальной шкале (0—5) по ГОСТ 5640—68, построенной по принципу возрастания числа ферритных полос с учетом степени их сплошности и вытянутости зерен ($\times 100$).

При изготовлении штампованных деталей сложной формы необходимо использовать листовую сталь, полосчатость которой не превышает 3-го балла. Если полосчатость оценивается более высоким баллом (4, 5), это указывает на

упрочнение и анизотропию свойств стали, возникающих вследствие предшествующей холодной пластической деформации (например, холодной прокатки). Для устранения полосчатости высокого балла применяют рекристаллизационный отжиг.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

Испытания на растяжение. Методика проведения испытаний на растяжение черных и цветных металлов — листов и лент толщиной до 3 мм регламентирована ГОСТ 11701—84, толщиной свыше 3 мм — ГОСТ 1497—84, сортового проката — ГОСТ 1467—77.

При испытаниях на растяжение устанавливают соответствие характеристик механических свойств металла требованиям стандартов на технические условия поставки. Наличие площадки текучести на диаграмме растяжения указывает на склонность металла к старению и образованию полос скольжения.

Для оценки штампуемости листового металла, применяемого для штамповки сложных по форме и глубоких деталей, кроме характеристик механических свойств, предусмотренных техническими условиями ($\sigma_{\text{в}}$, $\sigma_{\text{т}}$, δ и пр.), по ГОСТ 11701—84 допускается определение коэффициента нормальной пластической анизотропии R^* , показателя деформационного упрочнения n , относительного равномерного удлинения $\delta_{\text{р}}$ [1].

Под *анизотропией* понимают различие механических свойств листового металла в различных направлениях прокатки, которое имеет текстурную и кристаллографическую природу.

*Коэффициент нормальной анизотропии R^** определяют по результатам испытаний на растяжение. Он представляет собой *отношение логарифмической деформации по ширине $\varepsilon_{\text{в}}$, к деформации по толщине образца $\varepsilon_{\text{с}}$ на участке равномерной деформации ($\delta_{\text{р}} = 15 \div 20 \%$) в выбранном направлении прокатки:*

$$R^* = \varepsilon_{\text{в}}/\varepsilon_{\text{с}} = \ln(b_{\text{д}}/b)/\ln(s_{\text{д}}/s).$$

При равенстве деформаций по ширине и толщине $R^* = 1$ металл *изотропен*. Различают *нормальную* анизотропию, при которой коэффициент анизотропии практически одинаков в различных направлениях относительно направления прокатки листа, но отличен от единицы, и *плоскостную* анизотропию, при которой коэффициент анизотропии изменяется в плоскости листа в различных направлениях прокатки.

Для оценки анизотропии используют коэффициент Пуассона для пластической области или *коэффициента поперечной деформации r^** , представляющей собой отношение логарифмической деформации сжатия по ширине образца $\varepsilon_{\text{в}}$ к деформации растяжения $\varepsilon_{\text{л}}$ в направлении приложенной силы: $r^* = \varepsilon_{\text{в}}/\varepsilon_{\text{л}}$. Связь между R^* и r^* установлена в результате использования условия несжимаемости

$$r^* = R^*/(1 + R^*).$$

Коэффициент нормальной анизотропии R^* для большинства металлов $R^*=0,2\div 2,7$, значения коэффициента плоскостной анизотропии $r^*=0,167\div 0,73$ (при $R = 1$, $r^* = 0,5$). Изменение коэффициента нормальной анизотропии R^* в различных направлениях относительно направления прокатки листа показано на рис. 2.1.

При оценке влияния анизотропии на штампуемость металла часто пользуются средним коэффициентом анизотропии R^* , определяемым из значений коэффициентов анизотропии, полученных при испытании образцов на растяжение, вырезанных из листа, в различных направлениях — вдоль прокатки, поперек и под углами 45 и 135°, например:

$$\bar{R}^* = 0,25 \cdot (R_0^* + 2 \cdot R_{45}^* + R_{90}^*) = 0,25 \cdot (R_0^* + 2 \cdot R_{45}^* + R_{90}^* + R_{135}^*).$$

Показатель деформационного упрочнения n определяют по результатам испытаний на растяжение, он равен

$$n = \varepsilon_p = \ln(l_p/l_0)$$

или, учитывая, что

$$l_p = l_0 \cdot (1 + \delta_p);$$

$$n = \ln(1 + \delta_p). \quad (2.1)$$

Численно n равен тангенсу угла наклона кривой упрочнения, аппроксимированной прямой линией в логарифмических координатах, его физический смысл — логарифмическая степень деформации при растяжении в момент потери устойчивости. Методика определения R^* и n регламентирована ГОСТ11701—84.

Штампуемость металла зависит от R^* и n . Если в зоне пластической деформации возникает деформированное состояние, характеризующееся сжато-растянутой схемой (например, при вытяжке см. табл. 5), штампуемость металла больше зависит от R^* . При $R^* > 1$ листовой металл хорошо сопротивляется уточнению в опасной зоне и это позволяет вести вытяжку с высокой степенью деформации. Вместе с тем с увеличением R^* нарушается осевая симметрия деформирования, возникает окружная разнотолщинность стенок вытягиваемой детали и волнистость ее кромки, что вызывает необходимость увеличения припуска на обрезку неровного края и, следовательно, увеличивает расход металла.

Если в зоне пластической деформации превалируют деформации одноосного или двухосного растяжения (например, при формовке, см. табл. 5), штампуемость металла больше зависит от n , так как интенсивность деформационного упрочнения металла может превалировать над интенсивностью его уточнения. Хорошая штампуемость листовой стали наблюдается при $R^* \geq 1,2 \div 1,7$ и $n \geq 0,2$. На штампуемость листового проката влияет прочность, характеризующаяся значением σ_b , и пластичность, характеризующаяся значением σ_T . Чем выше σ_b , тем больше усилие деформирования и выше контактные напряжения.

В связи с этим может происходить выдавливание смазочного материала, возможно схватывание (налипание) металла, задиры. При этом стойкость штампов уменьшается. Указанные явления наблюдаются при вытяжке деталей из листового проката, имеющего $\sigma_B \geq 500$ МПа.

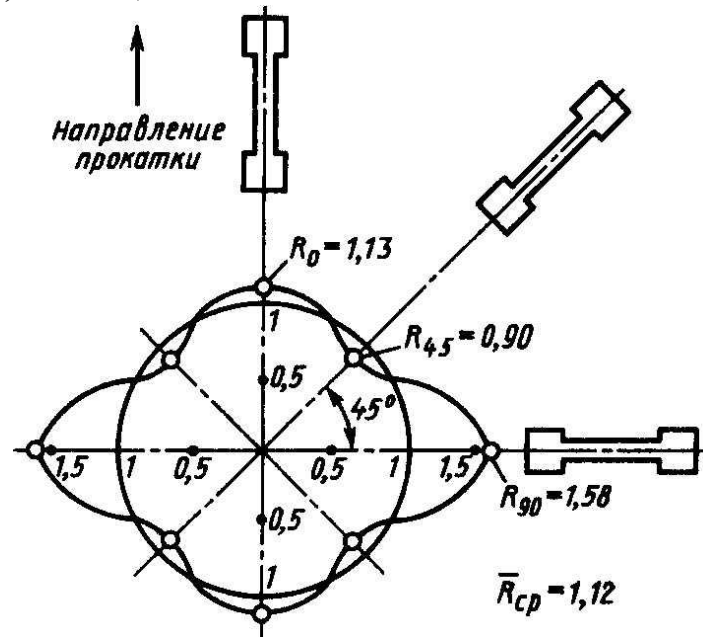


Рис. 2.1. Кривая изменения коэффициента нормальной анизотропии в различных направлениях относительно направления прокатки

При гибке (см. табл. 5) на значение упругих деформаций (пружинение) существенно влияет отношение σ_T/E , чем меньше это отношение, тем упругие деформации меньше. При неизменном модуле упругости E упругие деформации уменьшаются с уменьшением σ_T .

Изменение механических свойств металла при пластической деформации отражают *диаграммы истинных напряжений* (кривые упрочнения) и *диаграммы пластичности*. Параметры кривых упрочнения — критерии оценки штампуемости металла. Для определения этих параметров используют различные аппроксимации диаграмм истинных напряжений, предложенные рядом исследователей: Кербером $\sigma_i = A + B\varepsilon_i$; Х. Свифтом $\sigma_i = C(\varepsilon_0 + \varepsilon_i)^{n_1}$; А. Надаи $\sigma_i = C_1 \varepsilon_i^n$; П. Людвигом $\sigma_i = \sigma_T + C_2 \cdot \varepsilon_i^m$ и др. В приведенных уравнениях σ_i ; ε_i — интенсивность напряжений и деформаций; A ; B ; C ; C_1 ; C_2 ; ε_0 ; n ; n_1 ; m — константы, определяемые по результатам механических испытаний металла. Формулы для определения интенсивности напряжений и деформаций при линейном растяжении с учетом нормальной анизотропии металла имеют вид:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{3}{2} \cdot \frac{1+R^*}{2+R^*}} \cdot \sigma_1; \quad \varepsilon_i = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{2+R^*}{1+R^*}} \cdot \varepsilon_1,$$

где σ_1 , ε_1 — напряжение и логарифмическая степень деформации при линейном растяжении.

Диаграммы пластичности отражают критические деформации при различных схемах напряженного состояния. Их строят в координатах: критическая степень деформации сдвига λ_p — показатель напряженного состояния K , равный отношению среднего гидростатического напряжения σ_0 к интенсивности касательных напряжений T , ($K = \sigma/T$). Диаграммы пластичности в осях « λ_p — K » используют преимущественно при расчете критических деформаций, возникающих при холодной объемной штамповке. Диаграммы пластичности, построенные в компонентах главных критических деформаций ε'_1 и ε''_1 (их называют диаграммами предельных деформаций или диаграммами предельной штампуемости), более широко используют при определении критических деформаций, возникающих при холодной листовой штамповке.

Испытания на твердость служат для ориентировочной оценки степени упрочнения металла, они основаны на предположении, что между твердостью деформированного металла и интенсивностью напряжений и деформаций существует однозначная зависимость. Это предположение было подтверждено исследованиями П. Бриджмена, Я. Б. Фридмана, Г. А. Смирнова-Аляева, Ф. Д. Деля, В. А. Огородникова и др. По результатам испытаний на одноосное растяжение, сжатие, растяжение с кручением и пр. строят тарировочные диаграммы в осях: σ_i — HV — ε_i (HV — число твердости по Виккерсу). Располагая результатами измерений твердости в различных точках пластически деформированной детали и используя тарировочные диаграммы, можно определить интенсивность напряжений и деформаций в зоне измерений твердости и, таким образом, установить поле напряжений и деформаций. Испытания на твердость относятся к неразрушающим методам контроля, в этом их преимущество по сравнению с другими методами — разрушающими.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ (ПРОБЫ)

Технологические испытания (пробы) применяются для определения предельной степени деформации металла в условиях, моделирующих различные операции холодной штамповки: вырубку, гибку, вытяжку, раздачу, формовку, осадку и др. Если показатели технологических испытаний регламентированы стандартами (например, глубина лунки в момент потери устойчивости), то с помощью технологических проб устанавливают соответствие этих показателей требованиям стандарта.

Почти все виды технологических испытаний проводятся до момента локализации или появления трещин или разрыва, после чего фиксируется критическая степень деформации — критерий штампуемости металла.

Испытания на вырубку-пробивку. Их проводят с целью определения условного напряжения среза, представляющего собой отношение максимального усилия вырубki-пробивки к площади поверхности разделения ($\sigma_{ср} = P_{max}/F_0$). Кроме того, определяют глубину внедрения пуансона в металл к моменту появления скалывающей трещины в зоне разрушения (высоту блестящего пояса h). Испытания выполняют в специальном штампе для вырубki круга диаметром ~32 мм, оснащенном силоизмерительным устройством, при оптимальном

зазоре между пуансоном и матрицей. Чем больше высота h , тем металл более пластичен, чем больше прочность металла, тем $\sigma_{ср}$ больше, а стойкость инструмента ниже.

Испытание на перегиб и изгиб. Металл в виде листа или ленты испытывают на перегиб (ГОСТ 13813—68). Для этого полосу металла определенной ширины закрепляют в специальном приспособлении и проводят многократный двойной перегиб на 180° до момента разрушения. Число двойных перегибов до появления трещины является характеристикой этого вида испытаний.

Листовой металл также испытывают на изгиб до определенного угла вплотную или до соприкосновения сторон образца, т. е. до параллельности его сторон. Вид изгиба зависит от качества металла и его толщины. Если после испытания на изгиб на образце не обнаружено трещин, считается, что образец испытание выдержал (ГОСТ 14019—80).

Испытание на глубину формовки лунки. Оно было предложено шведским инженером А. Эриксом. Этот вид технологических испытаний пока еще наиболее распространен при оценке штампуемости листового проката толщиной от 0,2 до 2,0 мм. Испытание заключается в формовке сферическим пуансоном лунки в образце, прочно зажатом между матрицей и прижимным кольцом (

Испытание по Эриксу проводится на машине-приборе мод. МТЛ-10Г, 2068 МТВ-10, регистрирующей усилие формовки лунки и усилие прижима заготовки. Условия его проведения регламентированы ГОСТ 10510 - 2013, в соответствии с которым усилие прижима составляет 10 кН, заготовка в виде полосы должна иметь ширину 90 мм, диаметр пуансона 10 и 20 мм. Деформация металла происходит из-за уменьшения толщины заготовки, мерой испытания, в процессе которого в очаге деформации возникает двухосное растяжение, является глубина лунки IE в миллиметрах в момент уменьшения (спада) деформирующего усилия. Испытания по Эриксу *наиболее эффективны* в тех случаях, когда металл предназначен для получения *сложных пространственных выпуклых деталей сферической и параболической формы (типа отражателей автомобильных фар)*, при вытяжке которых в очаге деформации возникает двухосное растяжение, при других формоизменяющих операциях способ малоэффективен.

Характер разрушения и качество поверхности лунки позволяет судить о штампуемости металла: разрыв лунки по дуге окружности указывает на изотропность металла, прямолинейный разрыв свидетельствует об анизотропии металла, полосчатости структуры или о наличии дефектов прокатки. Чистая гладкая поверхность лунки характеризует мелкозернистую структуру, шероховатая — свидетельствует о крупнозернистой структуре металла.

Испытание на глубину формовки лунки проводят с целью установления категории листовой стали по ГОСТ 9045—80 (Г — глубокая; ВГ — весьма глубокая; СВ — сложная вытяжка; ОСВ — особо сложная вытяжка; ВОСВ —

весьма особо сложная вытяжка). Чем больше высота лунки, тем выше категория стали. У листовой стали 08 и 10 в зависимости от ее толщины и категории глубина лунки IE должна быть не менее 9—12 мм.

Нами рассмотрены испытания на штампуемость листового проката, только предусмотренные стандартами. В РФ и ряде зарубежных стран применяют многие другие технологические пробы для той же цели, к числу которых относится испытание на вытяжку цилиндрического колпачка по Свифту (Англия), на вытяжку цилиндрического колпачка с последующим отрывом дна по Энгельгардту (ГДР), на вытяжку конического колпачка по Фукуи (Япония) и многие др.

Наиболее полный обзор различных видов технологических испытаний (проб) приведен в работе Аверкива АЮ Методы испытания листового металла.

В России и за рубежом ведутся исследования по определению критериев оценки штампуемости металла на основе теории пластичности, а также по результатам статистического анализа экспериментальных данных. Одно из наиболее перспективных направлений этих исследований — определение ресурса пластичности на базе теории пластического течения металла в сочетании с результатами измерения ячеек деформированной сетки, предварительно нанесенной на заготовку. Это направление создано и развивается трудами А. Д. Томленова, В. Л. Колмогорова, И. П. Ренне и других ученых (РФ), С. П. Келером и Г. М. Гуд-виным (США), З. Марчиняком (ПНР).

Для оценки штампуемости листовых сталей используют теории разрушения от потери устойчивости в виде локального утонения или появления складок. В качестве характеристики локального деформирования А. Д. Томленов предложил коэффициент запаса пластичности:

$$\eta = \left[\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{i(kp)}} \right] < 1, \\ \delta$$

где ε_i , $\varepsilon_{i(kp)}$ — накопленная и критическая интенсивность деформации.

Накопленные деформации определяют по результатам измерения делительных сеток, предварительно нанесенных на заготовку, критические деформации рассчитывают:

при плоском напряженном состоянии одного знака

$$\varepsilon_{i(kp)} = 2n\sqrt{1-m+m^2}/(2-m);$$

при разноименном плоском напряженном состоянии

$$\varepsilon_{i(kp)} = 2n\sqrt{1-m+m^2}/(1+m),$$

где $m=\sigma_1/\sigma_2=(2\varepsilon_2+\varepsilon_1)/(2\varepsilon_1+\varepsilon_2)<1$ — показатель напряженно-деформированного состояния, определяемый без учета анизотропии. Чем ближе η к единице, тем больше вероятность потери устойчивости или разрушения детали после локализации в процессе штамповки и, следовательно, штампуемость металла хуже.

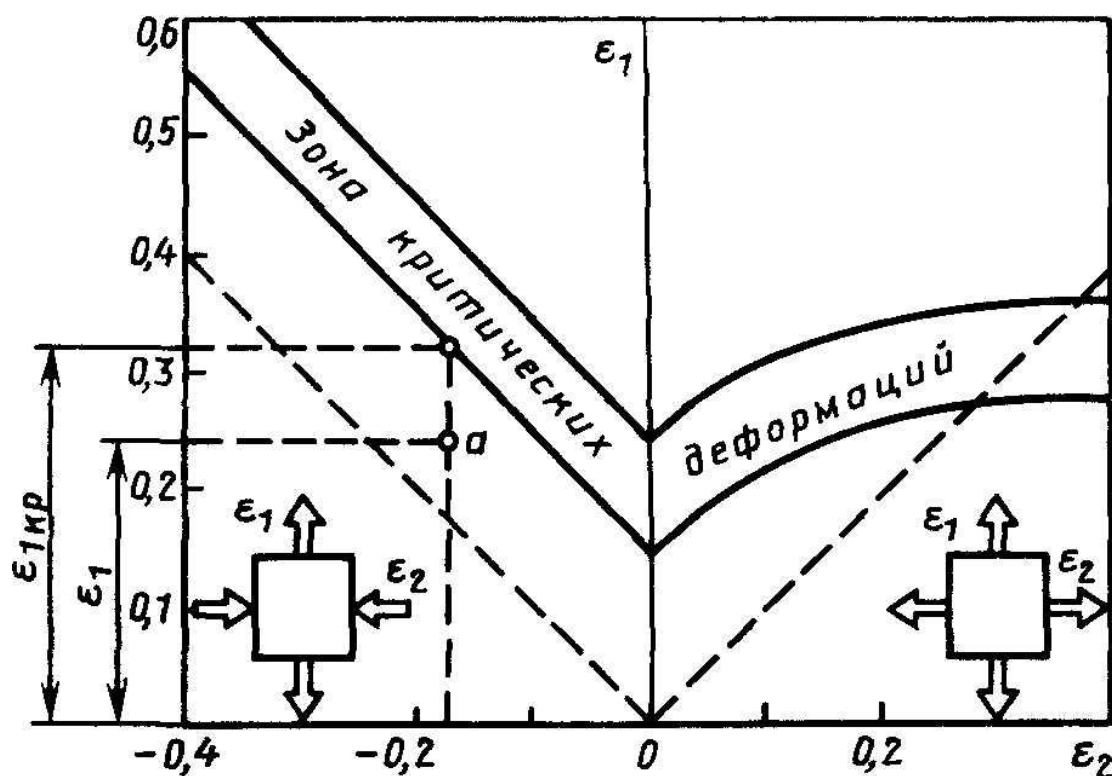


Рис. 2.3. Диаграмма предельных деформаций

В нашей стране и за рубежом для оценки штампуемости используют диаграммы предельных деформаций, устанавливающие связь между компонентами главных деформаций ϵ_1 и ϵ_2 в момент потери устойчивости от разрушения. Такого рода диаграммы (рис. 2.3) были предложены в 60-х годах С. П. Келером и Г. М. Гудвиным (США), с их помощью устанавливают границы предельных деформаций, действующих в плоскости листа. Зона критических деформаций разделяет диаграмму на две области, ниже этой зоны находится область безопасных условий штамповки и выше — область разрушения. По оси ординат диаграммы отложена наибольшая главная деформация в плоскости заготовки ϵ_1 а по оси абсцисс — наименьшая главная деформация ϵ_2 . Зона положительных значений ϵ_2 соответствует двухосному растяжению, при $\epsilon_2=0$ наблюдается* плоское деформированное состояние, в зоне отрицательных значений ϵ_2 — сжатие с растяжением [27].

Диаграммы предельных деформаций строят экспериментально для каждой марки и толщины металла по различным методикам [1]. Испытания по схемам 1 и 7 (табл. 3) предназначены для построения левой части диаграммы, по схеме 6 — правой, испытания по остальным схемам служат для построения как левой, так и правой части диаграммы. Образцы с предварительно нанесенной сеткой в виде окружностей диаметром 2—4 мм подвергаются растяжению на испытательной машине или в штампе-приборе, на котором проводят также формовку и вытяжку до момента разрушения или потери устойчивости. Для уменьшения контактного трения при формовке между пуансоном и образцом-заготовкой устанавливают тонкие полиуретановые прокладки. Сравнивая поле накопленных в компонентах деформаций с критическими, определяют запас пластичности в каждом сечении детали.