

Балтийский государственный технический университет
“ВОЕНМЕХ” Им. Д.Ф.Устинова
Кафедра Е4
“Высокоэнергетические устройства автоматических систем”



Отчет по научно исследовательской работе студента (НИРС-2).
Неравномерность деформации.

Выполнил: Лихошерстных И.А.

Группа: E1M31

Санкт-Петербург

2019 г.

Содержание

Введение	4
1 Неравномерность деформации	5
1.1 Закон дополнительных напряжений	9
2 Исследование неравномерности деформации в некоторых процессах ОМД	11
2.1 Неравномерность деформаций по толщине стенки при вытяжке с утонением	11
2.2 Неравномерность деформации при прокатке	17
Заключение	28
Список используемой литературы	29

Введение

Технические процессы обработки металлов давлением сопровождаются неравномерностью деформации - непостоянством коэффициентов деформации по ширине, высоте и длине деформируемых изделий. Неравномерность деформации определяется рядом факторов: формой заготовки и инструмента, неоднородностью химического состава металла и температуры по объему тела, наличием трения на контактной поверхности, упругими деформациями инструмента и др. При получении изделий сложной формы из прямоугольной заготовки неравномерность деформации является неизбежной. При осаживании заготовки, имеющей большую высоту, боковые поверхности получаются бочкообразными в результате подпирającego действия сил трения. На контактных площадках трение препятствует течению металла при осаживании, а к середине высоты образца подпирющее действие трения уменьшается и металл получает большее перемещение. Чем больше коэффициент трения на контактной поверхности, тем больше бочкообразность. При прокатке на блюминге в результате неравномерного напряженного состояния по высоте слитка в первых проходах пластически деформируется объем металла, прилегающий к валкам. Неравномерность напряженного состояния по высоте приводит к неравномерности деформации в поперечном сечении, и раскат имеет большую ширину в зоне контакта с валками и меньшую в середине высоты. Прокатка сортового металла всегда сопровождается неравномерностью деформации. При прокатке квадратной заготовки в овальном калибре в средней части обжатие металла по высоте меньше, чем по краям; при прокатке той же заготовки на диагональ в ромбическом калибре средняя часть получает большее обжатие.

1. Неравномерность деформации

Вынужденное выравнивание длины полосы при неравномерной деформации приводит к появлению дополнительных и остаточных напряжений по сечению изделий. В процессе деформации дополнительные напряжения растяжения приводят к возникновению трещин и разрушению металла при их критическом значении, к повышению деформирующего усилия. По окончании деформации в металле, получившем неравномерное обжатие различных частей, возникают остаточные напряжения, которые могут привести к нежелательным деформациям готового проката.

Равномерность деформации возможна при соблюдении ряда условий: одинаковые напряжения во всех точках деформируемого тела; отсутствие трения на контактной поверхности; одновременная деформация всего тела; изотропные свойства деформируемого тела.

Отсюда причины, обуславливающие неравномерность деформации (по И. М. Павлову): наличие сил контактного трения; несоответствие формы инструмента и деформируемого тела; неоднородность свойств обрабатываемого материала; особый характер приложения нагрузки (изгиб, кручение); наличие остаточных напряжений в теле.

1. Внешнее трение - препятствует течению металла по контактной поверхности. К поверхности контакта примыкают зоны затрудненной деформации, которые распространяются в глубь тела на некоторую величину. В этих зонах всестороннее сжатие выражено наиболее сильно, и металл обладает наиболее высоким сопротивлением деформации. Внешнее проявление неравномерности деформации - бочкообразование осаживаемого тела. От трения зависит схема напряженного состояния, а от нее - пластичность и деформируемость стали. В общем случае при осадке цилиндрического тела можно выделить три зоны с различной деформируемостью (рисунок 1).

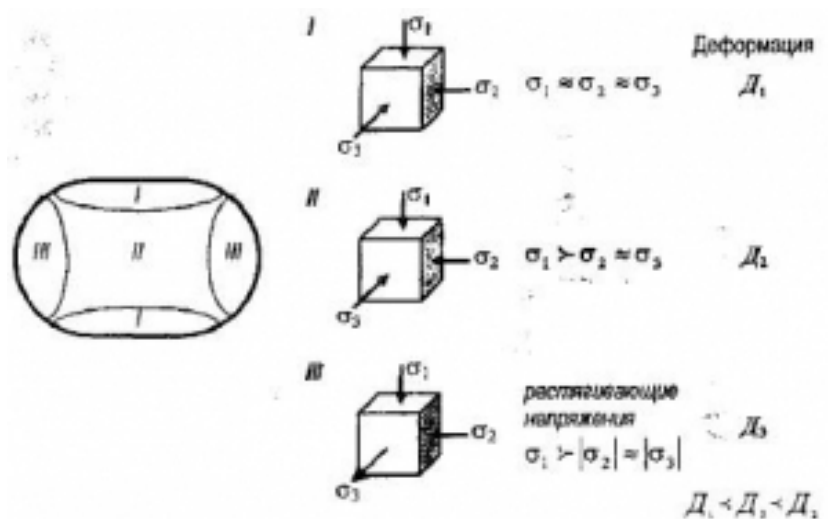


Рисунок 1 – Зоны при осадке цилиндрического образца

В первой зоне разность между напряжениями незначительна и может не отвечать условию пластичности, хотя сами напряжения (уровень) велики. В третьей зоне сдерживающее влияние сил трения такое же, как во второй зоне, но схема напряженного состояния другая (имеется напряжение растяжения), что снижает пластические свойства и ухудшает деформируемость осаживаемого тела. Схема напряженного состояния влияет на усилие деформации.

Степень неравномерности деформации зависит и от того, насколько развита контактная поверхность по отношению к объему деформируемого тела. При прокатке листа и осадке эти отношения выражают через F/H . Чем больше F/H , тем меньше неравномерность деформации. Особенно резко неравномерность деформации проявляется при деформации высоких тел (например, прокатка на блюминге, осадка высокого цилиндрического образца с небольшим диаметром). В этом случае наблюдается двойное бочкообразование.

В центральную часть слитка деформация не проникает вообще. Очень сильно выражена неравномерность деформации (в центре возникают дополнительные напряжения растяжения). Но при увеличении контактной поверхности (увеличиваются ширина заготовки, длина очага деформации, величина обжатия) влияние контактных сил трения будет сказываться на большую глубину, вызывая там пластическую деформацию и уменьшение неравномерности деформации. Таким образом, контактное трение может

играть положительную роль с точки зрения глубины проникновения деформации.

2. Несоответствие формы инструмента и деформируемого тела. Во многих случаях форма инструмента отличается от формы исходной заготовки. Если заготовку представить в виде узких полосок металла, то каждая из них будет удлиняться пропорционально своему обжатию по высоте $\mu_{\text{макс}}$ - в 1 сечении, $\mu_{\text{мин}}$ - во 2 сечении. Но так как заготовка - монолитная, то $\mu_{\text{факт}} = F_0/F_1$, и эта вытяжка будет средней.

Металл первого сечения стремится к удлинению, но удерживается соседними зонами, и в нем возникают дополнительные сжимающие напряжения. Металл второго сечения получает дополнительные растягивающие напряжения (рисунок 2).

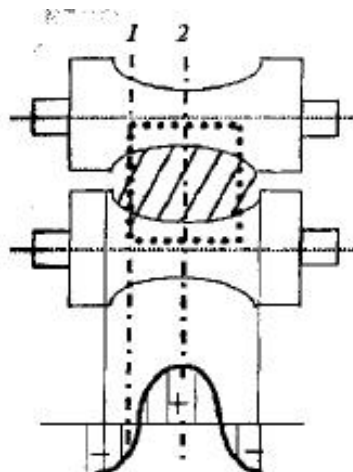


Рисунок 2 – Обжатие полосы

Возникновение дополнительных напряжений из-за неравномерности деформации может привести к изменению формы, размеров и разрушению продукции.

При прокатке двутавра интенсивное удлинение стенки ($\Delta h_2 > \Delta h_1$) приводит к тому, что она растягивает фланцы по длине и производит их утяжку по ширине профиля (рисунок 3, а), то есть уменьшает высоту фланцев, что необходимо учитывать при расчете калибровки валков.

При прокатке заготовки ромбического сечения в квадратном калибре деформация средних слоев больше, чем крайних (по горизонтальной

плоскости сечения), что приводит к появлению растягивающих напряжений на ребре (оно более холодное) и появлению трещин (рисунок 3, б).

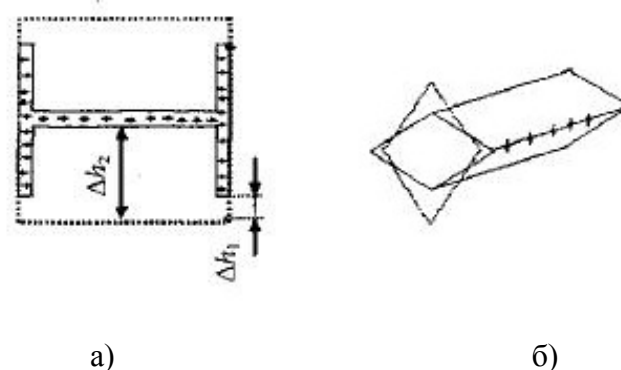


Рисунок 3 – Прокатка двутавра (а), прокатка ромбической заготовки (б)

Тепловая выпуклость вала приводит к неравномерной деформации листа и дефекту «коробоватость» (рисунок 4, а). Изгиб валков в результате больших нагрузок или их износ приводит к неравномерной деформации листов и дефекту «волнистость» (рисунок 4, б).

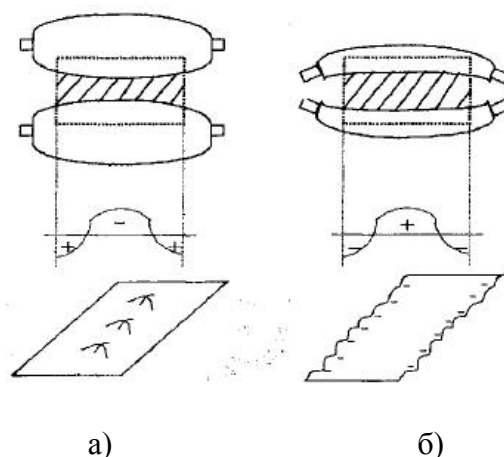


Рисунок 4 – Дефект коробоватости (а), дефект волнистости при прокатке

Изгиб валков необходимо учитывать либо исходной профилировкой валков, либо устройством оперативного вмешательства в конфигурацию зазора между валками.

3. Неоднородность свойств деформируемого тела. Причины неоднородности:

- неоднородность химического состава стали. В 20-ти тонном слитке СтЗкп при среднем содержании углерода 0,15%, содержание в отдельных объемах колеблется в пределах 0,07-0,35%. Чем больше масса слитка, тем

выше химическая неоднородность. Такая неоднородность химического состава сохраняется вплоть до получения готового профиля;

- структура металла - неоднородна. В слитке имеются три зоны: наружная (мелкие кристаллы), средняя (столбчатые кристаллы), внутренняя (крупные равноосные кристаллы). Величина зерна зависит от степени предыдущей деформации;

- разница температур по сечению деформируемой заготовки. Нагрев металла перед прокаткой считается нормальным, если $\Delta t = 20-50^{\circ}\text{C}$. Но из-за недостаточной мощности нагревательных средств разность температур в центре и на поверхности заготовки может быть больше. Разность температур может возникать в результате сложности формы тела, отдельные элементы которого после горячей деформации будут охлаждаться с разной скоростью. Например, разность температур на фланцах и стенке двутавровой балки может достигать $\Delta t=150-200^{\circ}\text{C}$, а в подошве и головке рельсов - $\Delta t=100-120^{\circ}\text{C}$;

- деформация биметалла. Аналогично будет вести себя при пластической деформации неравномерно нагретая заготовка.

1.1. Закон дополнительных напряжений

Дополнительные напряжения создают взаимно уравнивающиеся силы, в неравномерно деформируемом теле могут быть напряжения растяжения. Вероятность разрушений тем больше, чем резче выражена неравномерность деформации, меньше площадь сечения слабо обжимаемых частей и меньше пластичность деформируемого тела. Вопрос этот изучали ряд исследователей, из которых в первую очередь следует упомянуть И. М. Павлова, С. И. Губкина и Н. И. Корнеева. В связи с неоднородностью деформации отдельные слои и элементы деформируемого тела стремятся к различному изменению размеров. В то же время отдельные слои и элементы тела не могут изменить своих размеров самостоятельно без влияния на соседние слои и элементы. «Поэтому слои, стремящиеся к большему изменению размеров против (некоторого) среднего значения, будут передавать слоям и элементам, стремящимся к меньшему изменению

размеров, силы такого знака, которые увеличивают изменение размеров. Слои и элементы, стремящиеся к меньшему изменению размеров, будут передавать слоям и элементам, стремящимся к большему изменению размеров, силы такого знака, которые уменьшают изменение размеров».

Эти напряжения имеют характерные признаки, отличающие их от основных деформирующих напряжений:

- возникают в результате неравномерной деформации;
- взаимно уравниваются внутри деформируемого тела. Это значит, что равнодействующая всех напряжений сжатия равна равнодействующей всех напряжений растяжения. Сами напряжения растяжения и сжатия могут быть не равны по величине;
- по окончании деформации остаются в теле, что необходимо учитывать в процессе производства и эксплуатации изделий.

Внутренние взаимно уравновешенные напряжения принято делить на группы (рисунок 5): напряжения первого рода уравниваются между отдельными слоями тела, в пределах всего объема или большей его части; напряжения второго рода уравниваются в пределах небольшого объема (несколько зерен); напряжения третьего рода - уравниваются в пределах одного зерна.

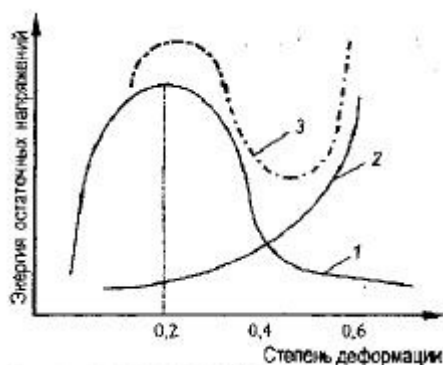


Рисунок 5 – Внутренние взаимно уравновешенные напряжения: 1 –первого рода; 2 – второго рода; 3 – общая энергия (по С.И. Губкину)

Напряжения второго и третьего рода являются следствием самой пластической деформации. Особенно опасны остаточные напряжения в наружных слоях тела, так как ухудшают его работоспособность. Поэтому

производят специальную обработку поверхности: обкатку, выглаживание, дробеструйную обработку, дрессировку, вызывающую в поверхностных слоях тела сжимающие напряжения для нейтрализации растягивающих напряжений, возникающих в процессе эксплуатации изделий.

Полное снятие остаточных напряжений достигается термической обработкой. Интересно поставлена задача использования остаточных напряжений и их целенаправленного наведения в листовом прокате в Японии (для последующей штамповки). Путем прокатки в нужном месте наводят внутренние остаточные напряжения определенной величины и знака, которые, суммируясь с напряжениями в результате штамповки, улучшают деформируемость металла.

2. Исследования неравномерности деформации в некоторых процессах ОМД

2.1. Неравномерность деформаций по толщине стенки при вытяжке с утонением

Вытяжка с утонением стенки применяется для получения высоких пустотелых деталей или полуфабрикатов, у которых толщина дна больше толщины стенки. Вытяжка с утонением осуществляется протягиванием заготовки в виде колпачка (полученного вытяжкой или каким-либо другим способом) через матрицу, при этом зазор z между пуансоном и матрицей должен быть меньше толщины стенки заготовки $\gamma = (D_M - D_n)/2 < s$. Данным способом вытяжки получают детали с полем допуска $h_9 - h_{12}$. Допуск на толщину стенки составляет 15—25 % номинальной толщины стенки, допуск на высоту полуфабриката — до 15 % его высоты. В процессе вытяжки с утонением происходит уменьшение первоначальной толщины стенки заготовки при относительно небольшом уменьшении ее диаметра. За одну операцию можно получить полуфабрикат значительно большей высоты, чем при вытяжке без утонения. При вытяжке с утонением очаг пластической деформации находится в зоне уменьшения толщины заготовки. Он мал по

сравнению с другими размерами полуфабриката и ограничен с обеих сторон упругодеформированными участками (рисунок 6).

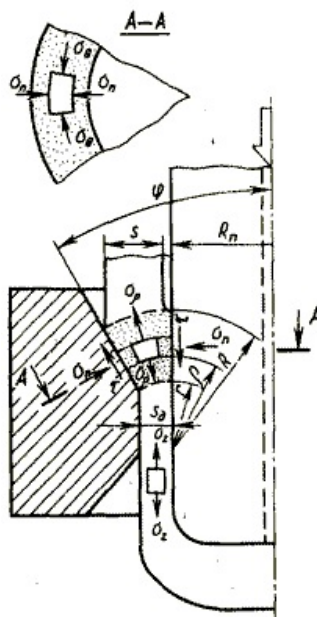


Рисунок 6 – Вытяжка с утонением стенки

Экспериментальные исследования, результаты которых опубликованы в работах [1, 2], показывают, что на неравномерность деформации и связанную с ней неравномерность механических свойств по толщине стенки существенно влияет угол ската матрицы. Это влияние тем более заметно, чем меньше степень утонения. В связи с этим, очевидно, нельзя полностью согласиться с довольно широко распространенным мнением, что критерием, определяющим оптимальные условия вытяжки и выбор угла ската матрицы, является потребное усилие. Зависимость усилия от угла ската матрицы обусловлена, как известно [3], потерями на трение, которые, как правило, увеличиваются с уменьшением угла.

Ниже приводятся результаты экспериментального и теоретического исследования, проведенного с целью установления зависимости показателей неравномерности деформации и механических свойств от угла ската матрицы и степени утонения стенки.

Экспериментальное исследование сводилось к определению основных характеристик механических свойств в различных частях стенки полуфабриката (по толщине) после вытяжки: в наружной (со стороны

матрицы) и во внутренней части стенки (со стороны пуансона). Из стенки полуфабриката примерно посередине его высоты после расточки изнутри (для определения механических свойств в наружной части стенки) или обточки снаружи (для определения механических свойств во внутренней части стенки со стороны пуансона)" вырезались в тангенциальном направлении образцы шириной 10 мм и толщиной 1—1,5 мм.

Для получения достаточно точных локальных характеристик механических свойств по толщине стенки, толщина стенки исходного полуфабриката выбиралась достаточно большой (в пределах 10-15 мм). Поэтому в зависимости от степени утонения при вытяжке толщина образцов составляла 0,15- 0,25 от толщины стенки.

Вытяжке подвергались полуфабрикаты, изготовленные из листовой стали 10 и латуни Л70, после нормальной термической обработки (предел прочности стали 10 $\sigma_b = 40 \text{ кг/мм}^2$, а латуни Л70 $\sigma_b = 32 \text{ кг/мм}^2$).

Вытяжка проводилась через матрицы с углами ската 6, 8, 10, 14, 18, 22 и 30° со степенями деформаций 20, 30 и 40%. Стальные полуфабрикаты перед вытяжкой подвергались фосфатированию. В качестве смазки использовалась мыльная эмульсия.

Наиболее значительная разница механических свойств наружной и внутренней части стенки наблюдалась при вытяжке со степенью деформации 20% через матрицы с большими углами ската.

Так как вытяжке подвергались полуфабрикаты, у которых соотношение лежало в пределах 15-20, то с достаточной степенью точности деформацию при вытяжке можно считать плоской. Поскольку в реальных условиях вытяжки значения коэффициентов трения не превышают 0,03-0,05, предполагается, что неравномерность деформации по толщине стенки не связана с условиями трения, а определяется только геометрическими параметрами инструмента, т. е. величиной угла ската матрицы. Поэтому при теоретическом анализе, целью которого является определение механических свойств, решение ведется без учета трения. Решение сводится к построению поля линий скольжения и определению значений интенсивности деформаций

при движении через пластическую область вдоль двух линий тока: линии тока, отвечающей наружной части стенки, проходящей вдоль образующей матрицы, и линии тока, отвечающей внутренней части стенки, проходящей вдоль образующей пуансона. По полученным значениям интенсивности деформаций сдвига определяется изменение механических свойств материала. Поля линий скольжения строятся для величин углов ската через каждые 5° в виде равноугольной пятиградусной сетки линий скольжения. Для каждого угла ската матрицы ряд значений степеней утонения определяется изменением угла ψ створа веера линий скольжения. Для каждого поля линий скольжения строится годограф скоростей.

Разумеется, предположение о возможности использования гипотезы жестко-пластического тела должно внести определенную погрешность, так как реальный материал упрочняется и действительное поле напряжений будет отличаться от принятого в теоретическом анализе.

Решение ограничивается такими степенями утонения, при которых пластическая область имеет контакт с пуансоном только в одной точке, т. е. когда:

$$r = \frac{H-h}{H} \leq \frac{2 \sin \alpha}{1+2 \sin \alpha}, \quad (1)$$

и границы пластической области являются линиями разрыва скорости.

С помощью годографа определяются значения интенсивности деформаций вдоль указанных выше двух линий тока [5].

Интенсивность деформаций Γ_{\min} вдоль линии тока, отвечающей внутренней поверхности полуфабриката и пересекающей пластическую область в точке, являющейся точкой пересечения двух линий разрыва скорости, определяется как сумма двух локальных приращений интенсивности деформаций сдвига на линиях разрыва скорости [4]:

$$\Gamma_{\min} = \Delta\Gamma_1 + \Delta\Gamma_2 = \frac{r(2-r)}{1-r}. \quad (2)$$

Интенсивность деформации Γ_{\min} вдоль линии тока, отвечающей наружной поверхности полуфабриката, вычисляется как сумма двух

локальных деформаций сдвига на линиях разрыва скоростей, отвечающих границам пластической области ($\Delta\Gamma_1$ и $\Delta\Gamma_2$) и интенсивности деформаций, накопленной при движении вдоль линии тока в пластической области ($\Delta\Gamma_{1,2}$):

$$\Gamma_{max} = \Delta\Gamma_1 + \Delta\Gamma_{1*2} + \Delta\Gamma_2 . \quad (3)$$

Первое и третье слагаемое определяется с помощью годографа, как отношение разрыва касательной составляющей скорости на линии разрыва к нормальной к линии разрыва составляющей скорости, а второе слагаемое может быть получено [5] в результате численного интегрирования уравнения

$$d\Gamma = \left| \frac{2 \cos \gamma}{V \sin 2\beta} \right| dl , \quad (4)$$

где γ — текущее значение угла между направлением скорости V и направлением касательной к годографу линии тока (направлением вектора приращения скорости dl); β — угол между направлением скорости V и направлением линий скольжения α .

Так как годограф рассматриваемой линии тока всюду совпадает с направлением одной из линий скольжения, т. е. $\gamma=\beta$ или $\gamma = \frac{\pi}{2} - \beta$ то уравнение (4) принимает вид:

$$d\Gamma = \left| \frac{1}{V \sin \gamma} \right| dl , \quad (5)$$

что значительно упрощает интегрирование.

Среднее значение интенсивности деформаций по толщине стенки Γ_{cp} может быть определено непосредственно из условия, что удельное усилие вытяжки при отсутствии трения равно удельной работе формоизменения.

При условии, когда $r < \frac{2 \sin \alpha}{1+2 \sin \alpha}$, находим:

$$\Gamma_{cp} = \frac{r}{1-r} (2\psi + 1 + \frac{x}{h} + \frac{2}{h} \int_0^{\alpha+\psi} y d\theta) . \quad (6)$$

В качестве характеристики неравномерности деформации использовалось отношение $\eta = \frac{\Gamma_{max}}{\Gamma_{min}}$. Когда степень утонения приближается к $r = \frac{2 \sin \alpha}{1+2 \sin \alpha}$, показатель неравномерности стремится к единице.

По значениям Γ_{\max} и Γ_{\min} были рассчитаны изменения механических свойств по уравнениям:

при $e_i > n$

$$\sigma_{d1} = \sigma_{b0} e^{n \left(\frac{e_i}{n}\right)^n}; \quad (7)$$

при $e_i < n$

$$\sigma_{b1} = \sigma_{b0} e_i^e, \quad (8)$$

где σ_{b0} - предел прочности исходного материала в кг/мм²; σ_{b1} - предел прочности, отвечающий соответствующей степени деформации; e_i - интенсивность линейных деформаций, $e_i = \frac{1}{\sqrt{3}} \Gamma$; n - степенной показатель упрочнения, который определялся по приближенной зависимости

$$n = e_p = \ln\left(1 + \frac{2\delta_{10} - \delta_5}{100}\right),$$

где e_p - истинная равномерная деформация, а δ_{10} и δ_5 - относительные удлинения 10- и 5-кратных образцов.

В расчетах были приняты следующие значения σ_{b0} и n :

для стали 10, $\sigma_{b0} = 40$ кг/мм², $n = 0,22$;

для латуни Л70, $\sigma_{b0} = 32$ кг/мм², $n = 0,50$.

Расчетные значения пределов прочности и характер их изменения для различных углов ската матриц и степеней утонений полностью согласуются с результатами экспериментального исследования.

Выводы:

1. Предложена простая методика расчета механических свойств, отвечающих наружной и внутренней частям стенки, в зависимости от угла конусности матриц и редукиций.

2. Результаты вычислений показывают, что неравномерность деформации и соответствующая ей неравномерность механических свойств

всегда имеет место, если $r < \frac{2 \sin \alpha}{1 + 2 \sin \alpha}$, и растет с увеличением угла и уменьшением редукции.

3. Полученные результаты показывают, что угол матрицы следует выбирать в соответствии с редукцией по условию:

$$\alpha < \arcsin \frac{r}{2(1 - r)},$$

которое обеспечивает минимальную неравномерность механических свойств по толщине стенки.

2.2. Неравномерность деформации при прокатке

Прокатка — процесс пластического деформирования тел на прокатном стане между вращающимися приводными валками (часть валков может быть не приводными). Слова "приводными валками" означают, что энергия, необходимая для осуществления деформации, передается через валки, соединённые с двигателем прокатного стана. Прокатка относится к числу основных способов обработки металлов давлением. Прокаткой получают изделия (прокат) разнообразной формы и размеров. Как и любой другой способ обработки металлов давлением прокатка служит не только для получения нужной формы изделия, но и для формирования у него определенной структуры и свойств.

Процесс прокатки делится на три вида:

1. Продольная прокатка (рисунок 7). При продольной прокатке полоса подводится к валкам, вращающимся в разные стороны, и втягивается в зазор между ними за счет сил трения на контактной поверхности. Таким способом получают листы, плиты, ленту, фольгу, сортовой прокат, периодические профили, гнутые профили и др.

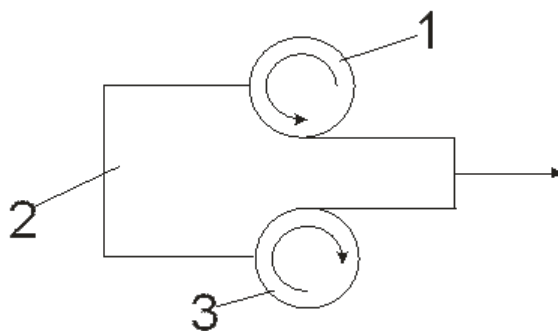


Рисунок 7 – Продольная прокатка: 1 – верхний валок; 2 – нижний валок; 3 – заготовка

2. Поперечная прокатка (рисунок 8). При поперечной прокатке обрабатываемое тело (цилиндрической формы) помещается в зазор между двумя валками вращающимися в одну сторону и получает вращательное движение за счет сил трения на контактной поверхности. Поперечная прокатка используется для изготовления валов, осей, втулок и других тел вращения.

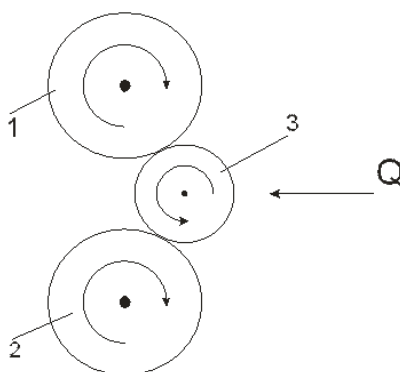


Рисунок 8 – Поперечная прокатка: 1,2 – верхний и нижний валки; 3 – заготовка; Q – удерживающая сила

3. Поперечно-винтовая прокатка (косая) (рисунок 9). Этот способ широко используется для получения полых трубных заготовок (гильз). Обрабатываемое тело (цилиндрической формы) проходя между валками, вращается и одновременно совершает поступательное движение, то есть каждая точка тела (за исключением расположенных на его оси) движется по винтовой траектории.

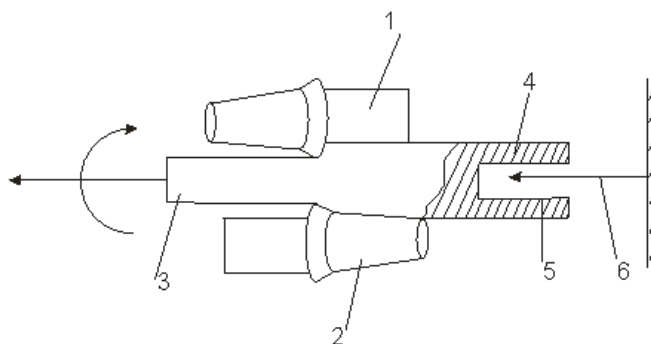


Рисунок 9 – Поперечно-винтовая прокатка: 1,2 – правый и левый валок; 3 – заготовка; 4 – гильза; 5 – оправка; 6 – штанга

При условии равномерной деформации при прокатке толщина исходной полосы h_0 по всей ширине и длине одинакова, зазор между валками h_1 по всей длине бочки валков и сопротивление деформации прокатываемого металла по всему его объему также одинаковы. Наблюдающиеся почти всегда отклонения от этих условий приводят к неравномерной деформации. Различают:

1. Неравномерность деформации по ширине полосы.

Этот вид неравномерной деформации проявляется в неравномерном распределении обжатия по ширине полосы и вызывается следующими действующими совместно или порознь причинами:

а) неодинаковым зазором между валками (перекос валков, неравномерный разогрев бочки валка, выработка валка, прогиб калибры на валках имеют разную высоту по ширине);

б) неодинаковой исходной толщиной полосы по ширине.

Степень неравномерности деформации по ширине можно охарактеризовать диаграммами естественных вытяжек. За естественную принимается вытяжка, которую получила бы та или иная часть полосы, если бы она деформировалась отдельно, вне связи с другими частями. Естественные вытяжки сравниваются со средней вытяжкой, которая определяется как отношение сечений до прохода и после него: $\lambda_{cp} = F_0/F_1$. Чем больше разница между естественной и средней вытяжкой, тем больше неравномерность деформации.

Примером может послужить диаграмма вытяжек при прокатке полосы переменного сечения по ширине в гладких валках (рисунок 10, в).

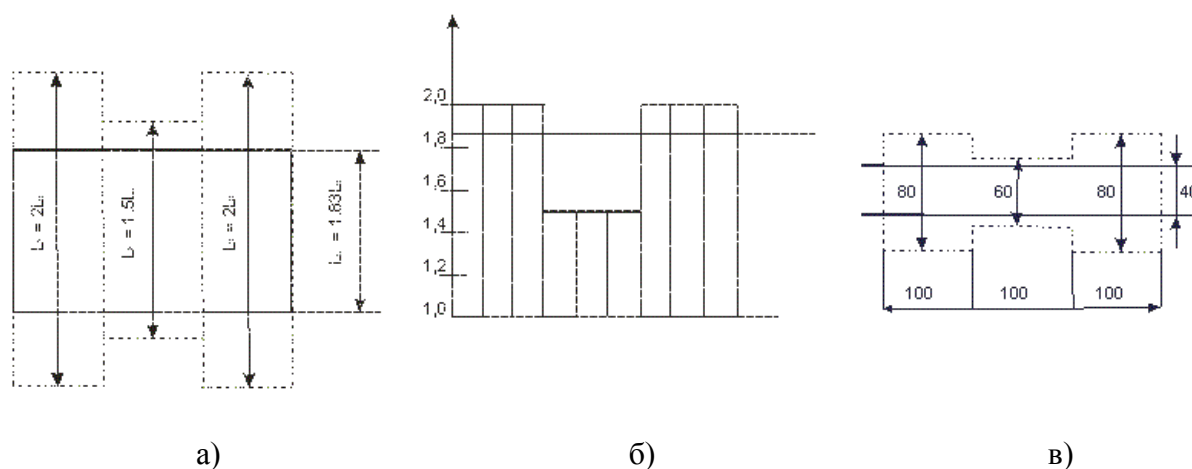


Рисунок 10 – Диаграммы вытяжек

Поперечное сечение полосы можно разбить на три части шириной каждая по 100мм, имеющие высоту: края – по 80мм, середина 60 мм. При обжатии такой полосы до 40 мм каждая часть стремится получить свою вытяжку (для упрощения расчета уширение не учитывается): края – $\lambda_1 = \lambda_3 = 2,0$; середина – $\lambda_2 = 1,5$. Фактически вся полоса получает некоторую среднюю вытяжку:

$$\lambda_{cp} = F_0/F_1 = (80 \cdot 100 + 60 \cdot 100 + 80 \cdot 100)/(40 \cdot 300) = 1,83.$$

В соответствии с этим и длина полосы после прокатки будет некоторой средней длиной $L_c = 1,83L_0$ (рисунок 10, а). Диаграмма вытяжек для данного случая представлена на рисунке 10, б.

Выравнивание вытяжек неизбежно приводит к различию уширения неравномерно обжимаемых участков полосы, что вытекает из закона постоянства объема. Удлинение частей полосы, получающих большее обжатие, меньше ожидаемого (естественного) (на рисунке 10– края), поэтому уширение их больше величины естественного (свободного) уширения. Такое уширение называют - вынужденным. Удлинение частей полосы, получивших меньшее обжатие, больше естественного удлинения (на рисунке 10 – середина). Вследствие этого ширина их уменьшается. Сужение полосы (отрицательное уширение) называют - утяжкой.

При прокатке широких полос малой толщины, когда уширение практически отсутствует, выравнивания вытяжек не происходит. Каждая часть полосы получает естественную вытяжку и, если обжатия неравномерны, длина неравномерно обжимаемых участков будет неодинаковой. Но это возможно лишь при прокатке коротких полос. В большинстве случаев избыток длины сильно обжимаемых участков полосы образует волны, но если прочность и жесткость этих участков достаточно велики, то на слабо обжатых участках полосы образуются надрывы.

Выравнивание длин при неравномерной деформации по ширине приводит к появлению дополнительных напряжений. Те части, которые обжимались в большей степени, получают вытяжку меньше естественной, так как их сдерживают слабо обжимаемые участки. В результате в зонах повышенного обжатия возникают напряжения сжатия. Наоборот, части полосы, обжатые в меньшей степени, будут растягиваться под действием частей, получивших большее обжатие. Напряжения разных знаков взаимно уравниваются по отдельным зонам полосы и, следовательно, они являются напряжениями первого рода.

Напряжения сжатия могут привести к волнистости или коробоватости прокатываемой полосы. Напряжения растяжения при превышении предела прочности металла могут привести к появлению трещин, рванин. Например, при прокатке полосы с утолщенными краями (рисунок 10) по краям возникают напряжения сжатия. При достаточной их ширине края могут получиться волнистыми. Средняя часть полосы получает напряжения растяжения. Если напряжения растяжения превысят предел прочности металла, посередине могут образоваться рванины.

Несимметричная неравномерность деформации большей частью приводит к искривлению прокатываемой полосы. Примером несимметричной неравномерности деформации по ширине может послужить прокатка полосы прямоугольного сечения в перекошенных валках. В данном случае обжатия от одной кромки к другой постепенно возрастают, соответственно увеличиваются и вытяжки. Разность вытяжек, образующаяся в очаге деформации, воздействует как на передний, так и на задний конец

прокатываемой полосы. При этом передний конец получает плавное искривление в горизонтальной плоскости (серповидность), загибаясь в сторону меньше вытяжки. Задний конец поворачивается в сторону меньшего обжатия, приводя к смещению полосы вдоль бочки валка (полосу ведет) и даже выбрасыванию её за пределы рабочей части валков (рисунок 11). Аналогичные явления наблюдаются в случае прокатки полосы клиновидного поперечного сечения при параллельном расположении валков.

Неравномерность деформации по ширине может привести к образованию такого дефекта, как порез. Он получается при прокатке тонких листов в сильно вогнутых валках. В этом случае края полосы на входе в валки «ведет» к середине, где лист собирается в складку, в результате чего в валки попадает тройная толщина листа. В этом месте лист сам себя режет, мнется и идет в брак.

При прокатке полосы в вогнутых валках неравномерность деформации способствует центрированию полосы относительно середины бочки валков. При смещении полосы вправо правая кромка получает повышенное обжатие, задний конец смещается влево и полоса возвращается в середину бочки.

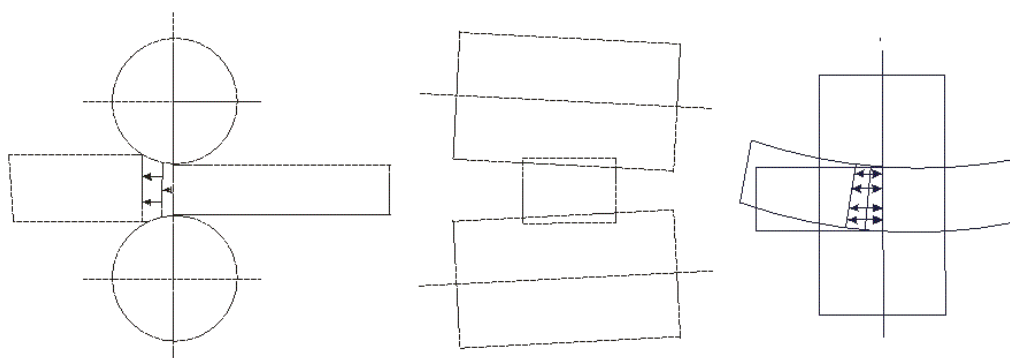


Рисунок 11 - Прокатка полосы прямоугольного сечения в перекошенных валках

2. Неравномерность деформации по толщине полосы.

Этот вид неравномерной деформации проявляется как неодинаковое обжатие отдельных горизонтальных слоев полосы. Одной из причин её может быть различие сопротивления деформации отдельных слоев.

Рассмотрим обжатие двухслойной полосы не вращающимися валками одинакового диаметра (рисунок 12). Верхний слой – свинцовый, имеющий

малое сопротивление деформации, нижний – алюминиевый, имеет более высокое сопротивление деформации. Верхний валок вдавливается в свинец на большую глубину, чем нижний валок – в алюминий. Усилия, действующие на оба валка, равны между собой, согласно условию равновесия сил. Площади соприкосновения металлов с валками различные: у верхнего валка контактная площадь больше, чем у нижнего. Усилие, действующее на верхний валок $P_1 = p_1 \cdot F_1$; усилие, действующее на нижний валок $P_2 = p_2 \cdot F_2$. Согласно условию равновесия сил, имеем $p_1 \cdot F_1 = p_2 \cdot F_2$, но $p_1 < p_2$; $F_1 > F_2$.

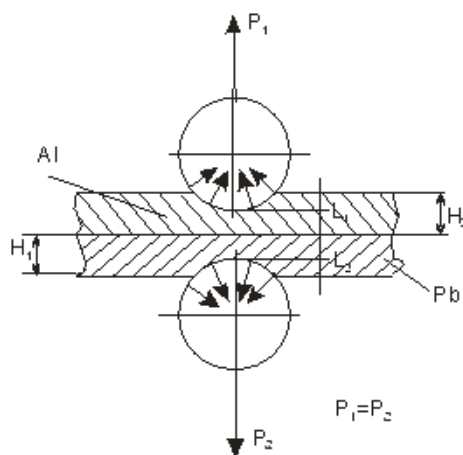


Рисунок 12 – обжатие двухслойной полосы не вращающимися валками

Обжатия верхнего и нижнего слоев в рассматриваемом случае также неодинаковы. Свинцовый слой обжимается в большей мере, чем алюминиевый, то есть $(H_1 - L_1) > (H_2 - L_2)$, следовательно, и вытяжка свинцового слоя будет больше, чем алюминиевого. Если эти слои не связаны между собой, то каждый из них получает при деформации свою естественную вытяжку. Если же слои связаны между собой (как, например, у биметалла), то при прокатке полоса будет изгибаться в сторону меньшей вытяжки, в данном примере – вниз (рисунок 13).

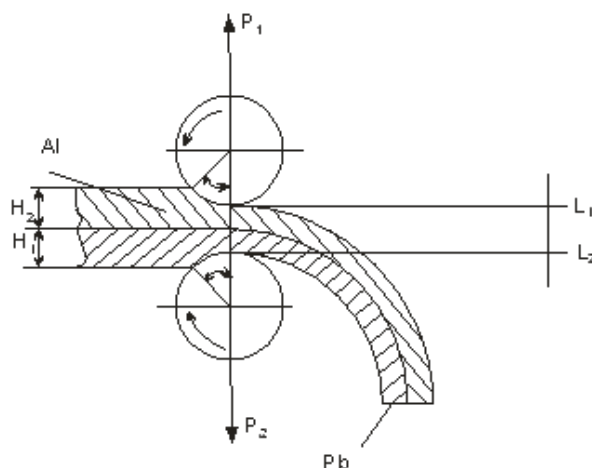


Рисунок 13 – Изгиб полосы в сторону меньшей вытяжки

Таким образом, при неравномерной деформации по толщине так же, как и для случаев неравномерной деформации по ширине, отдельные части полосы стремятся получить естественную длину в соответствии с обжатием их.

Аналогичные явления происходят и при прокатке неравномерно прогретой полосы. Вследствие различия сопротивления деформации отдельных слоев углы захвата у верхнего и нижнего валков различны. Величины обжатия верхнего и нижнего слоев можно выразить через углы захвата: обжатие верхнего слоя $H1 - L1 = R \cdot (1 - \cos \alpha_1)$; обжатие нижнего слоя $H2 - L2 = R \cdot (1 - \cos \alpha_2)$. Определим отношение обжатий верхнего и нижнего слоев: $(H1 - L1) / (H2 - L2) = (1 - \cos \alpha_1) / (1 - \cos \alpha_2)$. Для малых значений углов получим: $(H1 - L1) / (H2 - L2) \approx (\alpha_1 / \alpha_2)^2$.

Для прокатки без уширения по условию равенства усилий, действующих на верхний и нижний валки: $(p_2 / p_1) \approx (\alpha_1 / \alpha_2)$. Если сопоставить два последних уравнения получим:

$$(H1 - L1) / (H2 - L2) = (p_2 / p_1)^2.$$

Это уравнение выражает закон распределения обжатий при неравномерной деформации по толщине: частные обжатия слоев металла, имеющих различные сопротивления деформации, обратно пропорциональны квадратам сопротивлений деформации этих слоев.

Неравномерная деформация по толщине полосы приводит к появлению в металле дополнительных напряжений. В слоях полосы, получивших большие обжатия, возникают дополнительные напряжения сжатия, а в слоях, получивших меньшие обжатия – напряжения растяжения. Дополнительные напряжения могут привести к дефектам. Наиболее частым дефектом при горячей прокатке, например, биметаллической проволоки, имеющей стальной сердечник и медную оболочку, является разрыв стального сердечника. Стальной сердечник, имея большее сопротивление деформации, меньше деформируется по сравнению с медной оболочкой. В результате в нем возникают дополнительные напряжения растяжения. Если эти напряжения превысят предел прочности сердечника, в нем возникают трещины (рисунок 14).

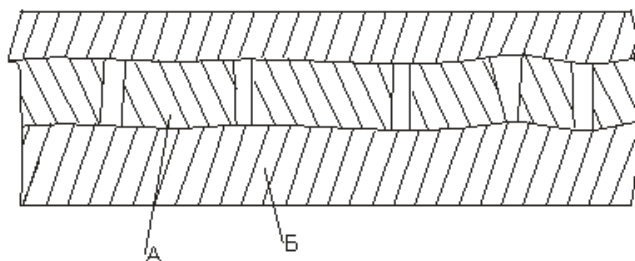


Рисунок 14 - Разрыв стального сердечника в биметаллической проволоке: А – стальной сердечник; Б – медная оболочка

Другим примером аналогичной неравномерности деформации по толщине может служить прокатка непрогретой заготовки или слитка (середина холоднее, поверхностные слои). При прокатке такого металла в средней его части также возникают внутренние напряжения растяжения и, как следствие их, внутренние трещины.

При неравномерной деформации по толщине возможно образование трещин и на поверхности металла, если сопротивление деформации поверхностного слоя металла больше, чем в середине (например, на поверхности металл подстыл).

Неравномерность деформации по толщине может быть связана так же со своеобразным распределением деформирующих напряжений. Если сжимающие силы, действующие со стороны валков на полосу в очаге деформации, представить в виде силовых линий, то эти линии будут

искривлены, и плотность их будет уменьшаться от контактной поверхности к середине полосы. В соответствии с этим и величина сжимающих напряжений будет уменьшаться в том же направлении. Степень искривления силовых линий зависит от соотношения между высотой и длиной очага деформации. Небольшая степень искривления силовых линий и, следовательно, небольшая разница в величине напряжений сжатия будут при большой высоте очага деформации и малой его длине. И, напротив, при малой высоте очага деформации и большой его длине можно считать, что силовые линии почти не искривлены и напряжения сжатия в любом горизонтальном слое очага деформации одинаковы.

3. Неравномерность деформации по длине прокатываемой полосы. В каждый данный момент прокатки в стадии деформации находится лишь небольшая часть длины полосы (очаг деформации). Но даже в пределах этой небольшой части деформация не является равномерной. От плоскости входа в валки к плоскости выхода уменьшается скорость деформации, изменяется напряженное состояние и соотношение между продольной и поперечной деформациями.

Взаимодействие переднего и заднего концов с деформируемой частью полосы накладывает свои отпечаток на напряженное состояние и характер перемещения частиц в очаге деформации.

Таким образом, процесс прокатки сам по себе служит примером резко выраженной неравномерности деформации по длине полосы, но неравномерность эта проявляется на прокатанной полосе весьма своеобразно. Вследствие регулярности процесса прокатки через очаг деформации последовательно проходят все участки длины полосы и каждый из них в равной мере испытывает неравномерность деформации. В результате размеры форма поперечного сечения, свойства металла и характер остаточных напряжений по все длине прокатанной полосы получаются одинаковыми. Исключение составляют лишь небольшие участки длины по концам полосы, прокатанные в условиях неустановившегося процесса. В связи с этим обычно считают, что деформация по длине прокатываемой полосы равномерна, если все поперечные сечения получают при прокатке

одинаковое изменение формы и размеров, а описанную выше неравномерность учитывают лишь при анализе процессов, протекающих в очаге деформации.

Другой вид неравномерности деформации по длине полосы наблюдается при изменении расстояния между валками за время одного прохода из-за колебаний упругих деформаций валков и других деталей рабочей клетки, вследствие изменения усилия прокатки или из-за «биения» валков при отсутствии строгой соосности шеек и бочек. Сечение полосы, получаемой в результате такой прокатки, будет неодинаково по её длине, причем изменяться может не только толщина, но и ширина полосы, а иногда и свойства прокатываемого металла.

В большинстве случаев неравномерность деформации такого вида нежелательна, так как она снижает точность размеров прокатываемой полосы. Особенно сказывается её вредное влияние при прокатке тонких полос, когда упругие деформации деталей рабочей клетки становятся соизмеримыми с толщиной прокатываемой полосы.

Для повышения точности прокатки стараются избегать «биения» валков, применяют рабочие клетки повышенной жесткости или специальные клетки предварительно напряженной конструкции. Иногда неравномерность обжатия по длине полосы создают специально, например, при выравнивании неравномерности толщины исходной полосы, при получении периодических профилей или, как их ещё называют, профилей переменного сечения (например, круглого профиля с переменным по длине диаметром).

Заключение

Неравномерность деформации является нежелательной, а в некоторых случаях должна быть строго ограничена. Таким образом, задачей разработки (проектирования) режимов деформации в процессах ОМД является управление неравномерностью деформации: сознательно накладывая одну неравномерность деформации на другую, получают возможно более равномерную деформацию по всему объему деформируемого тела.

Список используемой литературы

1. Ренне И. П. Прогрессивная технология холодноштамповочного производства. Машгиз, 1956.
2. Кузнецов В. П., Бузиков Ю. М. «Кузнечно-штамповочное производство», 1957, № -1.
3. Хилл Р. Математическая теория пластичности, ГИТТЛ, 1956.
4. Ренне И. П., Юдин Л. Г. Прогрессивная технология машиностроения. Приокское издательство, 1966.
5. Ренне И. П. «Известия вузов. Машиностроение», 1964, № 6; 1966, № 7.