



Министерство высшего и среднего специального
образования РСФСР

Уральский ордена Трудового Красного Знамени политехнический
институт имени С.М.Кирова

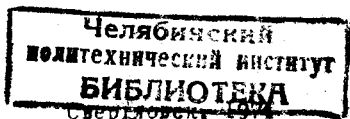
На правах рукописи

ЗАВЬЯЛОВА Александра Ивановна

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРУЕМОСТИ СТАЛЕЙ
ПРИ ВЫСОКИХ СКОРОСТЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ ОБРАБОТКИ
ДАВЛЕНИЕМ

(Специальность 05.16.05 - „Обработка металлов давлением“)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Работа выполнена на кафедре "Машины и технология обработки металлов давлением" Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола.

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор О.А.Ганаго.

Официальные оппоненты - доктор технических наук
В.И.Уральский;
кандидат технических наук
Ю.П.Согринин.

Ведущее предприятие - Конструкторско-технологический институт автоматизации и механизации автомобилестроения.

Автореферат разослан 11 января 1974 г.

Защита состоится 11 февраля 1974 г., в 14 ⁴⁵ час.,
в аудитории Мт-301, на заседании Совета по присуждению ученых степеней технологического факультета Уральского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института имени С.М.Кирова.

Отзывы на автореферат просим прислать в 2-х экземплярах с заверенными подписями по адресу: 620002, г.Свердловск, К-2, УПИ им.С.М.Кирова, ученому секретарю института, телефон 54-85-74.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА

Лопова

(Л.Лопова)

ВВЕДЕНИЕ

Планом девятой пятилетки предусматривается дальнейшее развитие кузнечно-штамповочного производства, которое характеризуется внедрением новых материалов, созданием мощных и быстроходных машин, оснащенных высокоточным и высокопрочным инструментом, разработкой прогрессивных технологических процессов.

Одним из перспективных методов обработки металлов давлением является высокоскоростная штамповка, которая осуществляется на молотах со скоростью удара 12-30 м/сек. Высокоскоростная штамповка, благодаря одноударности процесса, позволяет повысить точность и качество поковок и их механические свойства, отштамповать детали из особых сплавов, которые обычными способами получить невозможно. Опытная штамповка ряда поковок показала, что расход металла может быть уменьшен на 30-40% по сравнению с поковками, полученными на обычном оборудовании, а объем механической обработки снижен на 20-30%. Несмотря на очевидные преимущества высокоскоростной штамповки, ее внедрение на предприятиях идет крайне медленно, что в большей степени объясняется недостаточной изученностью способности материалов обрабатываться в новых условиях.

Для количественной оценки этой способности (деформируемости) используется два технологических параметра, рассматриваемые совместно: пластичность и сопротивление деформированию. К настоящему времени эти параметры исследованы для большинства марок сталей и сплавов при обычных скоростях, до 400 м/сек. Известно, что с увеличением скорости поведение материалов меняется. Исследование деформируемости сталей в интервале 500-2500 м/сек. позволит получить данные, необходимые для разработки технологических процессов высокоскоростной штамповки.

Кратковременность действия нагрузки при высокоскоростной штамповке усложняет и обособляет методику исследований. Кроме того, при исследовании пластичности и сопротивления деформированию и обработке результатов эксперимента используются различные методики, которые приводят к противоречивым данным. Поэтому задача создания единой научно-обоснованной методики, которая бы с достаточной для практики точностью позволяла установить оптимальные условия деформирования при минимальных затратах, является актуальной.

Глава I. Состояние вопроса, цель и задачи исследования

В теории деформируемости С.И.Губкина при описании способности металла к обработке давлением используется термин "технологическая деформируемость". Основные положения теории деформируемости: а) установление показателей, дающих возможность количественно оценить технологическую деформируемость; б) установление условий определения этих показателей. Для количественной оценки технологической деформируемости, или просто деформируемости, предлагается два параметра: сопротивление деформированию и пластичность. Указанные параметры достаточно изучены при обычных скоростях для большинства материалов. Но часто данные разных авторов не согласуются между собой. Это объясняется тем, что для характеристики параметров деформируемости применяются различные показатели:

1. Для оценки сопротивления деформированию: σ_s - истинное сопротивление деформированию при линейном напряженном состоянии; ρ - удельное усилие ($\rho = \sigma_s$ при равномерной деформации, но это равенство недопустимо, когда $\frac{L}{L_0} > 1$, так как влечет за собой значительные погрешности, особенно при осадке образцов с большими степенями деформации и при значительном внешнем трении, когда $\mu > 0,1$);

2. Для оценки пластичности: n - количество оборотов при испытании на кручение, ϵ - относительная степень осадки, ψ - относительное сужение, δ - относительное удлинение при растяжении, a_n - ударная вязкость, e_s - интенсивность деформации. Все эти показатели соответствуют различным схемам напряженного состояния, что затрудняет определение температурного интервала обработки давлением. Приступая к исследованию деформируемости какой-либо марки стали, прежде всего следует определиться в вопросах:

1) какие показатели выбрать для характеристики сопротивления деформированию и пластичности;

2) влиянием каких факторов можно пренебречь при определении этих параметров.

Большой вклад в создание методики исследования сопротивления деформированию и пластичности внесли советские ученые Н.У.Давиденков, Е.М. Унсков, Л.Д.Соколов, Л.А.Щофман, Я.У.Корнеев, А.А.

Пресняков, Г.А.Смирнов-Аляев, И.Я.Тарновский, В.И.Эззи, В.Н. Перетяtko, В.Л.Колмогоров и многие другие.

Значительная работа по созданию методики экспериментального исследования прочностных характеристик и пластичности при высоких скоростях и температурах деформирования проведена В.Г. Кононенко и В.П.Согришиным с сотрудниками. Последним изучалось влияние инерционного и теплового эффектов на приращение усилия, которое при определенных условиях может быть соизмеримо с величиной усилия деформирования.

В результате изучения состояния вопроса по литературным источникам сделаны следующие основные выводы:

1. Научно-обоснованным показателем пластичности следует считать интенсивность деформации сдвига λ_k к моменту разрушения.

2. Пластичность при постоянной температуре и скорости деформации зависит от схемы напряженного состояния. Научно-обоснованной характеристикой схемы напряженного состояния является показатель, представляющий отношение гидростатического давления к интенсивности касательных напряжений в точке ($\frac{\sigma}{\tau}$).

3. Методика получения зависимостей пластичности от показателя напряженного состояния отработана для сталей при обычных скоростях деформации. При высоких скоростях получение таких зависимостей является трудноосуществимой задачей - нет испытательного оборудования.

4. Научно-обоснованным показателем сопротивления деформированию следует считать истинное сопротивление деформированию, соответствующее линейному напряженному состоянию.

5. Исследование сопротивления деформированию при высоких скоростях производится методом осадки, при этом точность определения σ_2 зависит от точности измерения удельного усилия и используемых формул при вычислении коэффициента $K_1 = \frac{P}{S_2}$, который, в свою очередь, зависит от коэффициента внешнего трения и формы образца.

6. Положительной стороной последних работ по исследованию сопротивления деформированию является использование теории планирования эксперимента, которая позволяет сократить количество испытаний, выявить значимые факторы и создать многофакторную математическую модель.

7. При установлении оптимальных условий деформирования для конкретной поковки следует использовать диаграммы деформируемости - совмещенные графические зависимости сопротивления деформированию и пластичности от температуры.

На основании вышеперечисленных выводов были поставлены основные задачи: уточнение методики исследования сопротивления деформированию с использованием теории планирования эксперимента и уточнение методики исследования пластичности с целью получения данных с достаточной для практики точностью при наименьших затратах; исследование деформируемости выбранных марок стали с установлением оптимальных условий деформирования для конкретных поволоков; применение основных положений разработанной методики для исследования деформируемости сталей при обычной скорости.

Глава II. Уточнение методики исследования сопротивления деформированию

Для исследования сопротивления деформированию был принят метод осадки, так как в обработке давлением необходимы данные, соответствующие большим степеням деформации ($\epsilon > 30\%$). Более того, при высоких скоростях этот метод является практически единственно-осуществимым.

Известно, что сопротивление деформированию материалов с определенными металлургическими свойствами зависит от температуры, степени и скорости деформации, коэффициента внешнего трения, формы и соотношения размеров заготовки.

В рассматриваемой работе изучалось влияние на σ_s термомеханических факторов в следующих пределах: $t = 800 + 1200^\circ\text{C}$ - начальной температуры деформации; $\epsilon = 0,1 + 0,7$ - степени деформации; $\dot{\epsilon}_0 = 500 + 2500$ л/сек - скорости деформации в момент удара.

Точность определения сопротивления деформированию зависит от точности измерения усилия и перемещения в процессе деформирования. Постановка эксперимента по измерению усилия при высоких температурах и высоких скоростях связана с большими сложностями: необходимостью изготовления испытательного оборудования для осуществления ударного деформирования, применения электронной измерительной аппаратуры, нахождения подходящих ма-

рок стали для изготовления бойков, выдерживающих ударные нагрузки, определенные формы и размеры бойка - датчика, обеспечивающих получение качественной осциллограммы.

Для проведения высокоскоростных испытаний был создан экспериментальный участок. В качестве испытательного оборудования был установлен специально изготовленный копер с резиновым ускорителем, конструкция которого позволяет осуществлять удар со скоростью $V = 30$ м/сек и энергией до 1000 кгм. В качестве записывающего устройства использовались электронные осциллографы ОК-17М и С1-51. Разработанная методика измерения усилия и перемещения в процессе деформирования позволяет определить скорость удара и получить кривые упрочнения непосредственно из расшифровки осциллограммы.

Основным недостатком метода осадки является наличие трения на поверхностях контакта образца с инструментом. Для ослабления влияния трения рабочая поверхность бойков чисто шлифовалась и в дальнейшем, перед каждым опытным ударом, зачищалась мелкозернистой шкуркой с последующим нанесением смазки тонким ровным слоем. Опыт показали, что применение даже лучших смазок не позволяет осуществить линейное напряженное состояние в процессе осадки с большими степенями деформации. Влияние объемного напряженного состояния тем значительнее, чем больше отношение $\frac{D}{H}$. Это влияние учитывалось коэффициентом $K_A = \frac{P}{\sigma_s}$, где P - удельное усилие деформирования образца. Известно несколько формул для определения K_A в процессе осадки цилиндра. В данной работе использовалась формула У. Я. Гарновского, полученная на основе закона сохранения энергии и закона минимума полной энергии деформации,

$$\frac{P}{\sigma_s} = 1 + 0,09 \frac{D}{H} \sqrt{\mu \frac{D}{H}}, \quad (1)$$

где D, H - текущие размеры диаметра и высоты образца;

μ - коэффициент внешнего трения.

Практически формулой (1) можно воспользоваться, если известно μ .

В условиях высоких скоростей для определения коэффициента внешнего трения μ могут быть использованы только косвенные методы. Наиболее рациональным из косвенных является метод, осно-

важный на решении формулы по определению приращений размеров образцов в процессе сжатия между плоскими плитами. Анализ формул И.А.Тарновского по формоизменению загустовок в виде цилиндра, параллелепипеда и кольца показал, что наибольший эффект от применения косвенного метода может быть получен исследованием изменения диаметра полости кольцевого образца. Для отработки методики по определению коэффициента внешнего трения были подобраны размеры кольцевого образца: наружный диаметр $D_0 = 20$ мм, диаметр полости $D_n = 15$ мм, высота $H_0 = 10,5$ мм.

Такие соотношения размеров выбраны из расчета устойчивой формы кольца. Объем кольцевого образца равен объему цилиндрического $D_0 = 13$ мм, $H_0 = 21,5$ мм. По высоте образцы подобраны так, чтобы в процессе осадки обеспечивалась скорость деформации в выбранных пределах ($500 + 2500$ л/сек).

В результате расчетов по формулам У.Я.Тарновского для определения приращений размеров наружного радиуса кольца

$$\frac{\Delta R}{\Delta h} = \frac{0,5 \frac{R_n}{h}}{\frac{R_n}{R}} \left(1 - \frac{R^2}{R_n^2} - \frac{R_n^2}{R^2} \right) \quad (2)$$

и внутреннего

$$\frac{\Delta R_n}{\Delta h} = 0,5 \frac{R_n}{h} \left(\frac{R_k^2}{R_n^2} - 1 \right), \quad (3)$$

где R_k - радиус поверхности, разделяющей потоки металла внутрь и наружу, определяемый по формуле

$$\frac{R_k}{R_n} = \frac{0,48 \left(1 - \frac{R_n}{R} \right) + \psi \frac{R_n}{h} \left(1 + \frac{R}{R_n} \right)}{1,2 \left(1 - \frac{R_n}{R} \right) + 2\psi \frac{R_n}{h}}, \quad (4)$$

где $\psi = \mu + \frac{1}{8} \left(\frac{D - D_n}{2H} \right) (1 - \mu) \sqrt{\mu}$, (5)

были построены графические зависимости $D_n = f(H, \mu)$, которые в дальнейшем использовались для определения μ в конкретных условиях. В работе применялось два вида смазок: водно-графитовая и ланолино-графитовая (ланолин - 85%, графит - 15%)

В результате было выявлено, что осадка с применением вод-

но-графитовой смазки в изучаемых условиях соответствует $\mu \approx 0,1$, ланолино-графитовой $\mu \approx 0,05$.

Для определения влияния размеров и форм выбранных образцов на удельное усилие, провели предварительный эксперимент по осадке высокого, низкого цилиндра и кольца между шероховатыми и шлифованными бойками со смазкой. В результате было выявлено, что кривые $\rho = f(\varepsilon)$, полученные при осадке колец и высоких цилиндров, практически совпадают, а при осадке низких цилиндров они расположились выше на 18% - со смазкой, на 25% - без смазки (при $\varepsilon = 0,3$). Это значит, что при исследовании σ_s , когда допускается $\sigma_s = \rho$, наряду с цилиндрическими образцами ($\frac{H_0}{D_0} = 1,2$) успешно могут применяться кольцевые ($\frac{H_0}{D_0} = 0,55$, $\frac{D_n}{D_0} = 2$), а в случае равенства отношений $\frac{H_0}{D_0}$ цилиндрических и кольцевых образцов, последние увеличивают точность за счет течения металла в обе стороны от критической поверхности. Таким образом, в процессе осадки кольцевого образца можно получить одновременно данные по сопротивлению деформированию и коэффициенту внешнего трения, что в свою очередь, уменьшает количество испытаний.

Поправочный коэффициент K_d при вычислении истинного сопротивления деформированию кольца определялся также по формуле У.Я.Тарновского, полученной как и для цилиндра на основе закона минимума полной энергии деформации и вариационного принципа, которая в упрощенном виде может быть представлена так

$$\frac{P}{\sigma_s} = 108 + 0,18 \left(\frac{D_n}{D_0} - 1 \right) \psi \frac{D_n}{H}, \quad (6)$$

где первое слагаемое (108) представляет среднюю величину, которая изменяется от 1 до 1,16.

Влияние инерционных сил на σ_s для данных условий проверялось расчетным путем по ориентировочным формулам. В результате определили, что приращение удельного усилия не превышает $0,5 \text{ кг/мм}^2$, которым по сравнению со значением $\sigma_s \approx 60 \text{ кг/мм}^2$ практически можно пренебречь.

Так как на точность определения σ_s могут повлиять результаты замера температуры в момент удара, то этот вопрос также подвергался дополнительному исследованию. Нагрев образцов производился в электропечи. Для удобства загрузки в печь, уменьшения окалинообразования и интенсивности охлаждения при переносе

се к кону образец помещался в контейнере и вместе с ним нагревался. С момента выемки из контейнера и до момента удара по образцу в среднем проходило 3,8 сек. Были проведены опыты, в результате которых выявили, что в зависимости от температуры испытаний, температура нагрева образца должна быть выше на 4-20°C

Таким образом, последовательно анализируя существующие методы исследования σ_c и уточняя отдельные вопросы, была отработана методика с традиционным подходом к эксперименту. Используя методы теории планирования эксперимента, можно дополнительно сократить трудоемкость исследований, упорядочить обработку опытных данных, создать многофакторную математическую модель, устанавливающую связь между σ_c и влияющими на него факторами. Этот вопрос подробно рассмотрен в У главе.

Глава III. Уточнение методики исследования пластичности

Наиболее полную информацию о пластичности дают кривые предельной степени деформации в зависимости от показателя напряженного состояния для различных температур и скоростей деформации. Методика получения таких кривых разработана Г.А. Смирновым-Аляевым и В.Л. Колмогоровым. Используя эту методику, А.А. Лабутин исследовал пластичность двенадцати марок стали при комнатной температуре. А.Б. Митачев и Е.Г. Судов получили зависимости предельной степени деформации от показателя напряженного состояния при высоких температурах, в интервале 700-1300°C.

В настоящей работе была поставлена задача исследования влияния на пластичность показателя напряженного состояния, температуры и изменения скорости с целью анализа поведения выбранных марок стали при обычных скоростях деформирования и использования данных для сравнения с величинами, полученными при высоких скоростях. Для этого были изготовлены стандартные образцы из сталей двух групп: конструкционные легированные стали - 45X, 38XC, 12XН3А и нержавеющей стали - 1Х18Н10Т. Из стали 38XC образцы были изготовлены от двух плавок.

Показатель напряженного состояния варьировался проведением трех видов испытаний: на кручение ($\sigma/\sigma_0 = 0$), растяжение гладких образцов ($\sigma/\sigma_0 = 0,72$), растяжение образцов с выточ-

кой $\left(\frac{\sigma}{T}\right)_{ср} \approx 1,8$.

Испытания на кручение проведены на машине типа СМЭГ-ЮТ в ЦНИИЧЕРМЕТ со скоростью 15 об/мин ($\sim 0,08$ л/сек) и 60 об/мин ($0,3$ л/сек), испытания на растяжение со скоростью деформации $\xi_{ср} \approx 0,08$ л/сек проведены в лаборатории жаропрочных испытаний ЧМЗ. Погрешность эксперимента с надежностью 0,9 составляет в среднем 10%. Пластичность для всех исследованных марок в выбранном интервале температур снижается с увеличением показателя напряженного состояния в интервале $\left(\frac{\sigma}{T}\right)_{ср} = 0 + 0,72$ - в $1,5 \div 6$ раз и $\left(\frac{\sigma}{T}\right)_{ср} = 0,72 + 1,8$ - в $1,5 \div 4$ раза; пластичность с изменением скорости от 0,08 до 0,3 л/сек увеличивается для стали ЭЗХС в интервале 300-1000°C, примерно, на 80% и для стали IX18NiOT в интервале 1100-1200°C от 40% до 160%; кроме того, образцы, изготовленные от разных плавок одной и той же марки стали, при исследовании пластичности, при $\left(\frac{\sigma}{T}\right)_{ср} \approx 1,8$, вносят отклонения в результаты испытаний в $2 + 8$ раз.

Получение кривых пластичности при высоких температурах связано с большими трудозатратами, которые многократно увеличиваются при переходе в область высоких скоростей. В последнем случае требуются высокоскоростные установки на растяжение и кручение. В настоящее время при скоростях деформации $\xi > 400$ л/сек не представляется возможным получить кривые пластичности. Поэтому рациональным подходом в этом вопросе будет выбор одного вида испытаний, который наиболее соответствует схеме напряженного состояния рассматриваемого технологического процесса. Чтобы выбрать подходящий вид испытаний, требуется установить стадию в процессе штамповки, соответствующую наиболее жесткой схеме напряженного состояния, или наибольшему значению $\frac{\sigma}{T}$. С этой целью была поставлена очередная задача по определению интервала изменения показателя напряженного состояния в процессе объемной штамповки.

Процесс объемной штамповки нестационарен и условно делится на четыре основные стадии. Для решения поставленной задачи рассмотрены две крайних стадии: I - деформирование без бокового подпора; IV - доштамповка. Для изучения IV-й стадии была выбрана поковка типа стакана, отштампованная на высокоскоростном молоте. Рассмотрена половина ее продольного сечения.

Использован метод линий скольжения, при помощи которого определены значения σ в точках по границе пластической и жесткой зон. IV стадия процесса штамповки соответствует схеме трехосного сжатия, что подтверждается найденными отрицательными значениями показателя напряженного состояния.

Наиболее жесткая схема напряженного состояния будет проявляться на I стадии процесса штамповки, когда происходит свободная осадка или прошивка. I стадия характеризуется сжато-растянутой схемой - наличием напряжений растяжения. Изучая опыт осадки цилиндров между плоскопараллельными плитами, Г.А. Смирнов-Аляев разработал метод определения коэффициента жесткости на боковой поверхности цилиндрического образца $\frac{H}{D_0} = 2$. Метод Г.А.Смирнова-Аляева подтвержден экспериментально в условиях комнатной температуры при обычных скоростях. Чтобы его применить при высоких скоростях для осадки цилиндров $\frac{H}{D_0} = 1,2$ и колец, требуется установить, удовлетворяет ли изучаемый процесс условию $\frac{d\sigma}{d\epsilon} \geq 0,5$. С этой целью было проведено две серии опытов по осадке цилиндров и колец между плоско-параллельными бойками с ограничением до определенной высоты:

I серия. Осадка между шлифованными бойками без смазки.

II серия. Осадка со смазкой.

Каждая серия опытов проводилась в следующей последовательности. По середине образца острием керны проводились риски на расстоянии 1 мм x 1 мм, составляющие ячейку квадратной сетки, $l \times c$. Размеры ячейки замерялись на инструментальном микроскопе с точностью 0,005 мм до и после осадки. Далее вычислялись компоненты деформации:

$$\epsilon = \lg \frac{l}{l_0}, \quad \epsilon = \lg \frac{D}{D_0} = \lg \frac{c}{c_0}.$$

В результате проведенных экспериментов со смазкой и без смазки были получены опытные данные, сравнение которых с расчетными, полученными при помощи таблицы Г.А.Смирнова-Аляева показало хорошее совпадение. На основании этого сделали вывод, что для определения напряженно-деформированного состояния на боковой поверхности цилиндров с соотношением $\frac{H}{D_0} = 1,2$ следует исходить из условия $\frac{d\sigma}{d\epsilon} > 0,5$. Это значит, что интенсивность деформации и коэффициент жесткости в этом случае могут быть успешно определены по таблице Г.А.Смирнова-Аляева. При изучении больших конечных дефор-

маций таблицу необходимо продолжить. С этой целью были произведены дополнительные вычисления параметров на ЭМ.

В случае осадки цилиндров, например, $\frac{H_c}{D_c} \approx 0,4$ необходимо исходить из условия $\frac{d\zeta}{dz} = 0$ и пользоваться таблицей А.И.Хыбемяги. Работа А.И.Хыбемяги по этому вопросу является дальнейшим развитием методики Г.А.Смирнова-Аляева по определению напряженно-деформированного состояния на боковой поверхности осаживаемого образца.

Так как предполагалось при исследовании пластичности частично использовать, кроме цилиндрических, кольцевые образцы, то были поставлены опыты по выявлению отклонений зависимости $\zeta = f(z)$ для образцов различных размеров и форм. Результаты эксперимента показали, что практически нет отклонений в зависимостях $\zeta = f(z)$, полученных при осадке высоких цилиндров $\frac{H_c}{D_c} = 2$ и $\frac{H_c}{D_c} = 1,2$ и колец устойчивой формы $\frac{H_c}{D_c} = 0,35$, $\frac{D_o}{D_c} = 2$.

Таким образом, для определения показателя напряженного состояния на боковой поверхности цилиндров $\frac{H_c}{D_c} = 1,2$ и колец в условиях горячей высокоскоростной штамповки можно использовать методику Г.А. Смирнова-Аляева.

Определение интервала изменения $\frac{\sigma}{T}$ на первой стадии штамповки было произведено при температурах $800 + 1200^\circ\text{C}$ и скоростях деформирования $10 + 32$ м/сек для двух крайних случаев трения:

- 1) осадка образцов на грубых бойках;
- 2) осадка образцов на шлифованных бойках со смазкой.

Результаты опытов в работе представлены графическими зависимостями интенсивности деформации сдвига и показателя напряженного состояния от относительной степени деформации в %. Верхним пределом интервала изменения $\frac{\sigma}{T}$ в процессе объемной штамповки является значение $0,578$. Отсюда следует, что применительно к процессам объемной штамповки иковки нет необходимости проводить испытания, соответствующие показателям напряженного состояния более $0,6$. В этом случае необходимые сведения по пластичности могут быть получены одним видом испытаний - осадкой.

Проверочный анализ технологических процессов горячей штамповки показал, что степень деформации на I стадии не превышает 65% . Условно увеличили этот предел до 85% , выше которого осадку производить нерационально. Если при осадке со степенью деформации $\epsilon = 85\%$, которой соответствует верхний предел $\frac{\sigma}{T} = 0,58$ не будет обнаружена трещина, то можно считать, что материал в данных услови-

ях обладает способностью деформироваться без разрушения, т.е. достаточным ресурсом пластичности.

Глава IV. Исследование деформируемости сталей

Для исследования деформируемости при высоких скоростях и температурах были выбраны три марки стали: М ст 3, Э8ХС, БХНТ. Для удобства установления оптимальных условий деформирования экспериментальные данные по исследованным параметрам представлены в виде графических зависимостей $\sigma_s = f(t)$ - диаграмм сопротивления деформированию и $\lambda_k = f(t)$ - диаграмм пластичности. Совмещенные графические зависимости сопротивления деформированию и пластичности от температуры названы диаграммами деформируемости. Диаграммы деформируемости являются основным руководящим материалом при определении температурно-скоростного интервала деформирования конкретной поковки. В результате исследований получены диаграммы деформируемости для сталей М ст. 3, Э8ХС, БХНТ, например, рис. 1. В работе рассмотрены примеры практического использования диаграммы деформируемости с установлением оптимальных температурно-скоростных интервалов, исходя из допустимой степени деформации, сопротивления деформированию и стойкости штампов, для двух определенных поковок. По разработанной технологии поковки были отштампованы на высокоскоростных молотах (с энергией удара 9 тм и 6,8 тм) Результаты анализа показали удовлетворительное качество отштампованных поковок.

При исследовании деформируемости наиболее сложным и трудоемким процессом является определение сопротивления деформированию. В вопросе снижения трудоемкости исследований и наискорейшего достижения цели мощным инструментом в руках экспериментатора является теория планирования эксперимента, которая в настоящее время развивается в двух направлениях: планирование экстремальных экспериментов и планирование экспериментов по поиску математических моделей. Методы планирования экстремальных экспериментов десятки лет успешно используются в таких отраслях промышленности как химия, биология, физика, металлургия и др. В последние годы появились работы и в области обработки металлов давлением, в которых обоснованно преимущество оптимального планирования. Теория планирования многофакторного эксперимента основывается на

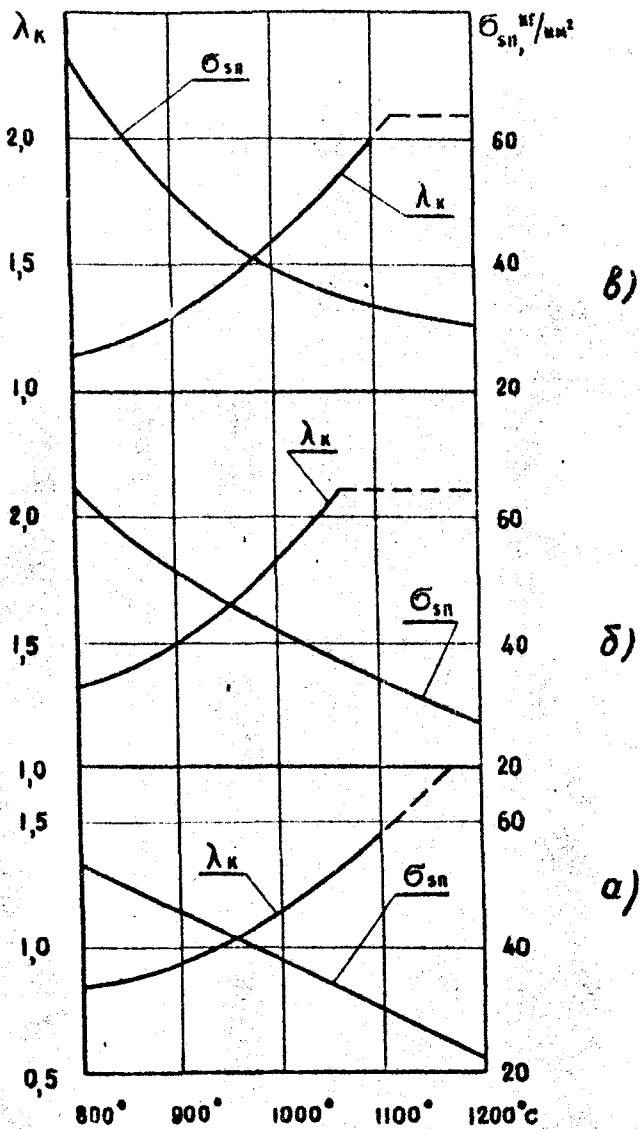


Рис. 7. Диаграммы деформируемости стали БХНТ при скоростях деформации ξ_0 ;
 а) 500 1/сек ; б) 1000 1/сек ; в) 1500 1/сек

0196325

одновременном изменении всех факторов, при этом предусматривается минимальное количество опытов, необходимых для решения поставленной задачи.

Глава V. Создание математической модели

Анализ результатов может считаться законченным, когда материал представлен компактно и произведена оценка надежности полученных данных. Здесь на помощь приходит математическая статистика, главной задачей которой является выявление объективных закономерностей. При изучении взаимодействия большого числа факторов методы математической статистики становятся незаменимы и оказываются наиболее эффективными, если эксперимент планируется в полном соответствии с тем способом, который в дальнейшем будет применен для обработки его результатов. Этот раздел изучает теория планирования эксперимента. При решении экстремальных задач для описания оптимального процесса, когда механизм явления сложен, изучаемая система плохо организована, теория планирования рассматривает математические модели в виде уравнений регрессии. Оценка модели производится с помощью различных критериев.

Планирование эксперимента можно применять также при изучении хорошо организованных систем, когда целью исследования служит изучение механизма явления, то-есть отыскание связи между изучаемыми величинами. Эти задачи относятся ко второму направлению теории - планированию эксперимента по поиску математической модели. Математическая модель в этом случае может оказаться нелинейной по параметрам, например, в виде суммы экспонент. Здесь может быть три различных постановки задачи:

1. Математическая модель известна. Требуется определить или уточнить неизвестные параметры.

2. Имеется много математических моделей. Требуется определить, которая является истинной, и найти неизвестные параметры.

3. Вид математической модели неизвестен.

Первые два типа задач более полно рассмотрены в литературе. Последний тип является наиболее сложным и менее разработанным.

В настоящей работе планируется эксперимент по поиску ма-

тематической модели для решения задачи третьего типа (вид модели неизвестен).

Для создания математической модели, устанавливающей связь между σ_s и термомеханическими факторами использовали одну из методик, где основой планирования являются латинские квадраты. Латинские квадраты не нашли еще широкого применения в отечественных работах. В тех случаях, когда факторам необходимо задавать много уровней, использование латинских квадратов может оказаться эффективным.

Для исследования σ_s какой-либо одной марки составляется план, например, рис. 2, с различной комбинацией факторов. При традиционном подходе к эксперименту перебираются все сочетания факторов и проводится 125 испытаний. Рациональное планирование эксперимента предусматривает выборочное проведение испытаний, только для тех сочетаний факторов, которые соответствуют выделенным клеткам плана. Опыты планируются так, чтобы ни в одной строке, ни в одном столбце не было повторных сочетаний, благодаря этому приему сокращается количество опытов со 125 до 25, и становится возможной рациональная обработка результатов эксперимента.

В работе подробно изложена методика поиска математической модели при исследовании сопротивления деформированию какой-либо одной марки стали, с определенными металлургическими свойствами. Для стали 38 ХС получена математическая модель для определения удельного усилия (при $\mu \approx 0,1$) в зависимости от факторов в следующих пределах: $t = 800 + 1200^\circ\text{C}$ - температуры, $\epsilon = 0,1 + 0,7$ - степени деформации, $\dot{\epsilon}_0 = 500 + 2500$ л/сек - скорости деформации и момент удара, $p = f(t, \epsilon, \dot{\epsilon})$,

$$p = 0,94 e^{4,814 - 0,0016 t} \sqrt{6,66 \epsilon [1 - (e^{0,666 \epsilon} - 1,22)]^2} \cdot \frac{\dot{\epsilon}}{\sqrt{500}} \sin \frac{\dot{\epsilon}}{250} \quad (7)$$

Для стали БХНТ получена математическая модель для определения истинного сопротивления деформированию σ_s в зависимости от тех же факторов, $\sigma_s = f(t, \epsilon, \dot{\epsilon})$,

$$\sigma_s = 0,015 e^{5,79 - 0,002 t} [1 - (e^{0,555 \epsilon - 0,083} - 1,61)^2] + 8,9 \frac{\dot{\epsilon}}{t} \quad (8)$$

По аналогичной методике создана математическая модель (9) для четырехфакторного комплекса в виде функции $\sigma_s = f(t, \epsilon, \dot{\epsilon}, M)$,

где M - четвертый фактор, определяющий влияние марки стали на σ_s .
 Для характеристики марки стали выбрано истинное сопротивление деформированию σ_{sp} , которое определили методом растяжения при температуре 1000°C , скорости деформации $0,03$ I/сек и степени деформации $0,2$. Для решения этой задачи были подобраны марки: Уст. 3, 45, ЭАКС, 5ХНТ, с характеристикой $M \approx 4,1; 5,1; 6,1; 7,1; 8,1$ соответственно.

$$\sigma_s = 0,57 \left\{ e^{-478 - 0,001st} \left[1 - \left(e^{2296E + 2044} - 1 \right)^2 \right] + 0,0035 + 4,68M \right\}. \quad (9)$$

Преимущество рационального планирования эксперимента при исследовании влияния четырех факторов еще более очевидно. Количество испытаний в этом случае сокращается с 625 до 25, то-есть в 25 раз. Полученная математическая модель (9) может быть успешно использована для ориентировочных расчетов.

МАТЕРИАЛ 5ХНТ																																							
$E = \ln \frac{H_0}{H}$		1 - 0,12					2 - 0,39					3 - 0,66					4 - 0,93					5 - 1,2																	
$t, ^\circ\text{C}$	$\dot{\epsilon}, \text{I/сек}$	500					1000					1500					2000					2500																	
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5													
1	800		52				52								71										76										62				
2	900		33					51								59									51														56
3	1000					48					49			39										39										37					
4	1100				38					37								45	27																	26			
5	1200			29								35		22											32			16											

Рис. 2. План эксперимента для исследования стали 5ХНТ

Большинство легированных сталей в рассматриваемых условиях достигают предела упрочнения в интервале относительной степени деформации $\epsilon \approx 0,3 + 0,5$. Осадка без бокового подпора на первой ступени процесса штамповки допускается, примерно, в этом же интервале. Поэтому потребное усилие (энергия удара) штамповки подбирается, исходя из наибольшего значения сопротивления деформированию $\sigma_{s, \max}$. Диаграммы деформируемости должны включать в себя сведения по сопротивлению деформированию, соответствующему пределу степенного упрочнения σ_{sn} . Исходя из этих соображений, формулу (9) можно преобразовать, принимая $\epsilon = \text{const}$. Таким образом, исключив влияние фактора ϵ , получили более простое выражение, $\sigma_{sn} = f(\epsilon, \xi, M)$,

$$\sigma_{sn} = 0,57(e^{478-0,0019t} + 0,003 \xi + 4,68M). \quad (10)$$

По формуле (10) произведены вычисления на ЭМ для различных сочетаний факторов в пределах: $600 + 1200^\circ\text{C}$ - температуры деформации; $500 + 1500$ [сек] - скорости деформации; $M = 4, I + 8, I$ кг/мм² ($M = \sigma_{sp}$).

Последним этапом работы является проверка возможности применения основных положений методики, разработанной применительно к условиям высокоскоростной штамповки, при обычных скоростях. Этот случай рассмотрен на примере исследования деформируемости колесной и бандажной стали. В результате получена диаграмма деформируемости и определен оптимальный температурный интервал ($1150 + 1250^\circ\text{C}$) осадки заготовок при изготовлении колес и бандажей.

З а к л ю ч е н и е

Данные, полученные советскими и зарубежными исследователями, показали качественно новые особенности в поведении материалов при высоких скоростях деформирования: возможность обработки дилатные материалы, которые при обычных условиях хрупко разрушаются; хорошее заполнение узких глубоких полостей, получение мелкозернистой равноосной структуры и тому подобное. Кроме того, на основании опытной штамповки и экономических расчетов подтверждена целесообразность внедрения высокоскоростной штамповки в промышленность. Но до настоящего времени еще не определена область ее применения. Здесь в какой-то степени сказывается недостаточная изученность способности материалов обрабатываться в новых условиях. Известно, что пластичность для различных материалов при высоких скоростях может

увеличиваться, уменьшаться или практически оставаться без изменения; сопротивление деформированию возрастает во много раз. Поэтому пользоваться данными, полученными при обычных скоростях, нельзя - это может привести к поломке оборудования, недоштамповке и другим видам брака. Ускорить процесс изучения основных термомеханических параметров сталей, необходимых при проектировании технологических процессов высокоскоростной штамповки, позволит разработанная методика, рассмотренная в настоящей работе.

По итогам всей работы сделаны следующие выводы:

1. На основании теории деформируемости С.И. Губкина для количественной оценки технологической деформируемости принято два параметра: истинное сопротивление деформированности (σ_s) и пластичность (λ_k).

2. Уточнена методика исследования пластичности:

а) для оценки пластичности принята степень деформации, предшествующая моменту разрушения, выражаемая через интенсивность деформации сдвига;

б) исследована пластичность в зависимости от показателя напряженного состояния для сталей 45X, 28XС, 12XН8А и 1Х18Н10Т при обычной скорости и высоких температурах. В результате выявлено,

что кривые предельной степени деформации в зависимости от показателя напряженного состояния дают максимальную информацию о пластичности материалов, но получение таких зависимостей, даже при обычных скоростях и высоких температурах, связано с большой трудоемкостью, а при высоких скоростях - является трудноосуществимой задачей, на основании этого принят один вид испытаний - осадка;

в) установлено, что методика Г.А. Смирнова-Аляева по определению показателя напряженного состояния на боковой поверхности осаживаемого цилиндра с $\frac{H_0}{D_0} = 2$ может быть использована в случае применения цилиндрических образцов $\frac{H_0}{D_0} = 1,2$ и кольцевых с $\frac{H_0}{D_0} = 0,35$, $\frac{D_0}{D_n} = 2$;

г) определены экспериментальные зависимости интенсивности деформации сдвига λ и показателя напряженного состояния $\frac{\sigma}{T}$ (при $\mu = 0,5$ и $\mu = 0,05$) от относительной степени деформации ($\epsilon, \%$) для выбранных размеров образцов в условиях горячей высокоскоростной

штамповки; показатель напряженного состояния в процессе осадки изменяется от $(-0,578)$ до $0,578$. Для случая осадки со смазкой $(\frac{\sigma}{\sigma_0})$ ср. $\approx -0,2$; без смазки на грубых бойках $(\frac{\sigma}{\sigma_0})$ ср. $\approx 0,4$.

5. Уточнена методика исследования сопротивления деформированию:

а) отработана методика одновременного измерения усилия, перемещения и скорости удара в процессе осадки образцов (на базе разработки конструкции и изготовления копра, ходографа - датчика перемещения, бойка-датчика усилия для получения качественных осциллограмм в заданном интервале скорости удара),

б) проведены расчеты для конкретных условий и установлено, что влиянием инерционных сил на сопротивление деформированию практически можно пренебречь;

в) экспериментально установлена зависимость средней скорости деформации за процесс осадки $(\xi_{ср})$ от скорости деформации в момент удара (ξ_0) ;

г) отработана методика учета потери тепла образцом в процессе осадки между холодными бойками;

д) отработана методика косвенного определения коэффициента внешнего трения;

е) обосновано применение кольцевых образцов, которые позволяют получить данные по сопротивлению деформированию, коэффициенту внешнего трения и частично по пластичности из одного и того же опыта;

ж) произведены расчеты значений коэффициента K_d для цилиндрических и кольцевых образцов по формулам У.Я.Тарновского, результаты которых могут быть использованы при вычислении истинного сопротивления деформированию;

з) использована теория планирования эксперимента, которая предусматривает минимальное количество испытаний, обеспечивает всесторонний анализ результатов, при помощи одного из ее методов получены многофакторные математические модели в виде функций:

$$\rho = f(t, \epsilon, \xi), \sigma_1 = f(t, \epsilon, \xi), \sigma_2 = f(t, \epsilon, \xi, M), \sigma_{2M} = f(t, \xi, M).$$

6. По разработанной методике в условиях горячей высокоскоростной штамповки исследована деформируемость трех марок стали:

Ист. 8, 8ХС, 5ХИТ. Результаты представлены диаграммами деформируемости.

7. Рассмотрен случай применения разработанной методики при обычной скорости на примере исследования деформируемости колесных сталей.

8. Разработанная методика по исследованию деформируемости позволяет получить данные с достаточной точностью и уменьшить трудоемкость испытаний: при обычных скоростях - в 1,7 раза и при высоких скоростях - в 2 раза на каждую марку стали.

9. Результаты исследования деформируемости сталей являются основным руководящим материалом при определении потребного усилия деформирования (энергии удара) поковки, допускаемой степени деформации и оптимального температурно-скоростного интервала.

10. Результаты исследований использованы на предприятиях отрасли.

Диссертация содержит 102 страницы текста, 26 таблиц, 64 рисунка и 15 приложений. Список литературы включает 89 наименований.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Определение оптимальных термомеханических параметров при скоростном деформировании. Тезисы докладов. 3 научно-техническая конференция Уральского Ордена Трудового Красного Знамени политехнического института имени С.М.Кирова. Свердловск, 1970 (в соавторстве)

8. Определение истинного сопротивления деформации при высоких скоростях деформирования. В сб. "Исследование машин и технологии обработки металлов давлением", Выпуск IV, Ужвск, 1970 (в соавторстве).

4. Определение коэффициента внешнего трения при умеренных и высоких скоростях деформирования. В сб. "Исследование машин и технологии обработки металлов давлением", Выпуск IV, Ужвск, 1970 (в соавторстве)

5. Исследование пластичности стали в зависимости от напряженного состояния, температуры, и скорости деформации. В сб. "Исследование машин и технологии кузнечно-штамповочного производства", № III, Челябинск, 1972 (в соавторстве)

6. Исследование влияния температуры и скорости деформации на упрочнение стали 8ХС. В сб. "Исследование машин и технологии

кузнечно-штамповочного производства", № III, Челябинск, 1972 (в соавторстве).

7. Исследование термомеханических параметров процессов обработки металлов давлением при высоких скоростях деформирования. В сб. "Исследование машины и технологии кузнечно-штамповочного производства", № III, Челябинск, 1972 (в соавторстве)

8. Оптимальные термомеханические условия деформирования металлов и сплавов. Информационный листок № 470-72, серия 127. Челябинский отраслевой территориальный ЦНТИ, 1972.

9. Исследование сопротивления деформированию стали с использованием метода рационального планирования эксперимента. "Кузнечно-штамповочное производство", 1972, № 12 (в соавторстве).

Результаты работы были доложены на:

- 1) XXII научно-технической конференции, посвященной 25-летию института, Челябинск, 1969;
- 2) XXV научно-технической конференции института, Челябинск, 1972;
- 3) IX-й городской научно-технической конференции, Челябинск, 1972;
- 4) семинаре "Пластичность и деформируемость при обработке металлов давлением. Московский Дом научно-технической пропаганды, 1972;
- 5) научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава завода ВТУЗа, при ЭИЛе, Москва, 1972;
- 6) Всесоюзном научно-техническом совещании "Пластичность и деформируемость при обработке металлов давлением", Свердловск, 1972.