

6
А-39

АКАДЕМИЯ НАУК КАЗАХСКОЙ ССР
ОТДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК

На правах рукописи

Э. В. Джангиров

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ
НА КОНТАКТЕ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ
АСИММЕТРИЧНОМ СЖАТИИ

(Специальность 01.023 — теория упругости и пластичности)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации, представленной на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Алма-Ата 1971

АКАДЕМИИ НАУК КАЗАХСКОЙ ССР
ОТДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК

на правах рукописи

Э. В. Джангиров

ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА
КОНТАКТЕ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ АСИММЕТРИЧНОМ СЖАТИИ

(Специальность 01.023 – теория
упругости и пластичности)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации, представленной на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Алма-Ата
1971

Диссертационная работа выполнена в лабораториях Фрунзенского политехнического института и металлофизики Института ядерной физики Академии наук Казахской ССР.

Научные руководители — профессор, доктор технических наук А.А.ПРЕСНЯКОВ, старший научный сотрудник, кандидат технических наук В.Н.СВИДЕНКО

Официальные оппоненты: профессор, доктор технических наук П.Г.КИРИЛЛОВ;
доцент, кандидат технических наук Р.С.ШАРИПУЛОВ

Ведущее предприятие — Кафедра "Сопротивления материалов и теории упругости" Казахского политехнического института им.В.И.Ленина

Просим Вас и сотрудников Вашей организации, интересующихся темой диссертации, принять участие в заседании Объединенного Ученого Совета Отделения физико-математических наук АН Казахской ССР или прислать отзывы в двух экземплярах по адресу:

г.Алма-Ата, 480045, Шевченко, 28. Отделение физико-математических наук.

Ориентировочная дата защиты " " 1971 г.

Автореферат разослан " " 1971 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Академии наук Казахской ССР, г. Алма-Ата, ул. Шевченко, 28.

Ученый секретарь Объединенного Совета, кандидат технических наук

А.Н.КАЗАНГАПОВ

Центральная научная
БИБЛИОТЕКА
Академии наук Киргизской ССР

СН 6
А39

Как отмечают С.И.Губкин, А.М.Качанов, В.В.Соколовский, А.А.Королев, Я.М.Охрименко, Е.П.Унксов, А.И.Целиков, А.А.Пресняков и др., одной из важных задач теории пластичности является создание наиболее точных аналитических методов определения усилий деформирования и конечных формоизменений. Это возможно лишь при глубоком изучении строения очага деформации и при наличии данных о величинах зон скольжения и прилипания на контактной поверхности и распределении в них нормальных и касательных напряжений. Исследования кинематических условий на контакте и усилий при пластическом деформировании, в настоящее время, не находятся в органической связи и единстве, отражающем протекание процессов.

При одноосном сжатии цилиндрических тел кинематические условия на контактной поверхности определены А.М.Грековым. Им же установлены закономерности изменения зон скольжения и прилипания и проведена их количественная оценка. Что же касается усилий деформирования, то лишь для плоской задачи они достаточно могут быть определены методом характеристик и инженерным методом, разработанными А.А.Ильиным, В.В.Соколовским, С.А.Христиановичем, Е.П.Унксовым. Однако для более сложных схем напряженного состояния и в частности прокатки, до сих пор не выявлена до

конца взаимосвязь между внутренними и внешними сторонами очага деформации. Многие исследователи (А.И.Колпашников, О.Г.Музалевский, Т.М.Голубев, И.Я.Тарновский, М.Л.Зарошинский и др.) ставили своей целью определить закономерности изменения явлений на контакте при указанной схеме деформации. Но ввиду сложности исследования процесса прокатки эти авторы изучали картину течения металла либо на боковой поверхности образцов, либо применяли слоистые образцы, исследуя не контактное перемещение, а внутреннее течение частиц, либо в качестве заготовок использовали неметаллические материалы (пластилин) или во многих случаях для исследования применили метод остановки полосы в валках.

Противоречивые мнения по вопросу влияния степени деформации, шероховатости рабочих частей инструмента и геометрических размеров образцов на трансформацию контактных зон скольжения и прилипания привели и к аналитическим решениям, не отображающим истинной картины соотношения этих зон. В связи с этим заслуживают внимания указания некоторых исследователей на возможность использования схемы сжатия между наклонным инструментом для моделирования явлений, происходящих в очаге деформации при прокатке. В этом случае, как отмечает Н.А.Соболевский, наклонные поверхности инструмента можно с достаточной для практики приближением принять за части валков, имеющих бесконечно большой радиус.

По мнению Е.П.Унксова использование процесса осадки между наклонными бойками "...представляет значительный

интерес с точки зрения удобства изучения на нем некоторых закономерностей течения металла и распределения напряжений справедливых полностью (в той или иной степени) для широко применяемых процессов обработки давлением - прокатки, вытяжки в конусных вырезных бойках и т.д."

Поэтому учитывая, что исследование процесса пластического деформирования прокаткой связано со значительными экспериментальными трудностями, нами использован метод последовательного приближения от осадки плоско-параллельными пластинами к асимметричному сжатию наклонным и цилиндрическим инструментом, который на наш взгляд приблизит к более сложному процессу - процессу прокатки. Причем, главными этапами последовательного приближения являются сжатие цилиндрических образцов наклонными бойками, осадка прямоугольных проб с внешними частями и без их наличия и пластическая деформация образцов инструментом, имеющим цилиндрическую контактную поверхность.

Таким образом, главной задачей нашей работы является исследование кинематических условий на контактной поверхности очага деформации при условиях последовательного приближения от одноосного осесимметричного сжатия к пластическому деформированию прокаткой.

1. Метод исследования

Исходя из поставленной задачи в качестве опытных материалов использовался свинец марки С1, алюминий марки А1 и ла-

тунь ЛС59-Г. Нагружение исследуемых образцов проводилось на лабораторно-испытательной гидравлической машине ЦД-100 усилием 100 тонн, а также на четырехсоттонном прессе модели П-479.

Исходные заготовки, предназначенные для образцов, с целью получения однородной структуры металла изготавливались из алюминия, свинца и латуни путем их проковки на кузнечном молоте, вес падающих частей которого 150 кг. Затем, заготовки обрабатывались на токарном и фрезерном станках до размеров, соответствующих определенным соотношениям d/h , B/h , e/h , e/B и $e/h_{\text{ф}}$. Причем, для того чтобы в начальный момент опыта соприкосновение между образцом и инструментом осуществлялось по всей поверхности проб, контактные части последних обрабатывались таким образом, что угол их наклона соответствовал углу наклона бойков. Угол наклона рабочих частей инструмента варьировался в пределах $\alpha = 2,5^{\circ} + 20^{\circ}$.

Особенность представляют образцы, предназначенные для сжатия образцов бойками, имеющими цилиндрическую контактную поверхность. В этом случае после получения образцов прямоугольной формы в средней части их контактной поверхности создавалась выемка, радиус которой соответствовал радиусу цилиндрических бойков. Затем для моделирования течения металла при прокатке по оси выемки выфрезировывался паз шириной 10 мм. При этих условиях опыта контактная поверхность образцов с достаточным приближением соответствовала мгновенному очагу де-

формации, наблюдающемуся при пластическом деформировании прокаткой.

Если при осадке плоско-параллельными плитами можно деформировать образцы с любым отношением d/h , то асимметричное сжатие наклонным инструментом ограничивает этот диапазон. Ограничение заключается в том, что при сжатии проб малой высоты, уже при сравнительно небольших значениях степени деформации происходит соприкосновение рабочих частей инструмента. С учетом этого величины отношений d/h и e/h в основном варьировались в пределах от 0,5 до 2,0.

В качестве рабочего инструмента использовались металлические бойки, изготовленные из стали 40Х, которые прошли термическую обработку до НВ С 50+55 единиц. Контактные поверхности бойков, с целью создания различных условий трения, были обработаны с разной степенью чистоты (4-10 классы).

Для изучения течения металла в очаге деформации в случае асимметричного сжатия, мы усовершенствовали и применили методику, разработанную А.М.Грековым, заключающуюся в нанесении контрольных тонких концентрических окружностей из нитрокраски на наклонную контактную поверхность образцов. Перед началом каждого опыта и после его проведения все радиусы расчетных точек, начиная от центра, замерялись во всех направлениях катетометром КМ-6, точность измерения которого равна 0,0015.

В случае же пластического сжатия наклонным и цилинд-

рическим инструментом прямоугольных образцов, на их контактные поверхности наносилась координатная сетка, расстояния которой до и после деформирования также замерялись катетометром. При опытах были такие случаи, когда из-за случайных микронеровностей поверхностей инструмента и образцов контрольные точки в начальный момент деформирования тела смещались от первоначального положения раньше, чем начиналось само скольжение. В связи с этим, явление скольжения констатировалось тогда, когда величина абсолютного приращения радиусов или расстояния между точками координатной сетки превышала один процент от первоначального размера.

Перед экспериментом отбирались серии образцов по 25 штук в каждой с различными отношениями d/h , b/h , e/h , у которых тщательно замерялись геометрические размеры. Параллельно с подготовкой образцов к опытам готовились и бойки. Обезжиривались их рабочие поверхности, удалялись всякого рода загрязнения, стружка и т.п. После этого приступали к проведению эксперимента.

Бралась серия подготовленных и пронумерованных образцов и инструмент определенного класса чистоты, первый из этой серии проб осаживался до степени деформации равной 5%. После снятия нагрузки производились все необходимые замеры деформируемого тела (высоты, диаметры, ширины, длина и т.д.), а также расстояния между concentрическими окружностями или сторонами координатной сетки. За-

тем тоже делалось с образцами, сжимаемыми до $\epsilon = 10\%$. В итоге, путем увеличения степени обжатия на 5% осаживались последующие образцы до $\epsilon = 70 + 90\%$ с записью всех размеров. Так, поэтапно, осуществлялось пластическое асимметричное сжатие образцов всех серий на бойках, обработка контактных поверхностей которых соответствовала 4 + 10 классам.

В процессе предварительных опытов обнаружилось, что первоначально нанесенные concentрические окружности и координатная сетка изменили свою форму, а развитие скольжения идет по иному закону, чем при сжатии плоскопараллельными плитами. Зона прилипания при этом имеет сложный контур, в которой для подсчета площади в случае осадки цилиндрических образцов удобно вписывать сектора, а в случае сжатия прямоугольных - фигуры наподобие неправильных эллипсов. Впоследствии выяснилось, что с увеличением обжатия происходит расщепление площади прилипания на две зоны. Кроме того, расщепляясь, зона прилипания мигрирует в сторону меньшей высоты образца. Иначе говоря, происходит изменение ее местоположения в процессе деформирования по отношению к предшествующему занимаемому положению. Оценку миграции зоны прилипания производим по отношению разницы между осью симметрии перемещенной области зоны прилипания и осью симметрии образца ко всей длине очага деформации $\Delta e/e$.

В связи с этим для отображения полной картины развития и изменения кинематического течения металла на контакт-

ной поверхности предложены: а) коэффициент прилипания, представляющий собой отношение площади прилипания ко всей контактной поверхности $k_{np} = \frac{S_{np}}{S_{об}}$, б) коэффициент трансформации, характеризующий расщепление зоны прилипания $k_{тр}$, в) коэффициент миграции k_m . На основе обширного количества экспериментальных данных строились графики изменения этих коэффициентов от степени деформации и контактных условий.

Кроме того, в процессе асимметричного сжатия наклонным инструментом обнаружилось, что степень деформации в каждом вертикальном сечении по длине образца различна. Закономерность изменения степени обжатия выражается зависимостью:

$$\epsilon_x = \frac{\Delta h}{h + 2l_x \operatorname{tg} \alpha} \quad (I)$$

где Δh — абсолютное обжатие, h — малая высота образца, l_x — отрезок длины очага деформации, в котором определяется величина обжатия, α — угол наклона инструмента.

Из формулы (I) видно, что неравномерность степени деформации зависит от угла наклона рабочих поверхностей инструмента, абсолютного обжатия и высоты образца.

2. Экспериментальное определение соотношения зон скольжения и прилипания при пластическом асимметричном сжатии

С целью выяснения кинематической картины в очаге деформации при условиях последовательного приближения от одноосного сжатия к пластическому деформированию прокаткой, нами, с использованием описанной выше методики, проведены эксперименты по определению соотношения различных зон при деформации цилиндрических, прямоугольных образцов наклонным и полукруглым инструментом.

а. Сжатие цилиндрических образцов наклонным инструментом

В процессе пластического деформирования цилиндрических образцов наклонными бойками выяснилось, что развитие скольжения, а также трансформация явлений расщепления и миграции зоны прилипания зависит от чистоты поверхностей инструмента, степени деформации, угла наклона бойков и геометрических отношений исходных размеров d/h . Рассмотрим вначале влияние исходных отношений диаметра к высоте на коэффициенты прилипания миграции и трансформации, при прочих равных условиях опыта.

Как показали данные исследования и анализ кривых изменения коэффициентов прилипания при сжатии высоких образцов, имеющих отношение $d/h = 0,5$ скольжение начинает появляться только при достижении степени деформации 25%. Дальнейшее повышение деформации свидетельствует о том, что зона прилипа-

ния по абсолютной величине уменьшается и при обкатки 70% она занимает всего двадцать процентов контактной площади. В случае достижения деформации равной 82,5% зона прилипания составляет один процент от всей площади контактной поверхности и при $\epsilon = 85\%$ очаг деформации представляет собой зону скольжения.

Если рассматривать данные, полученные при скатии проб, имеющих отношение $d/h = 1$, то в этом случае зона скольжения начинает появляться при степени деформации, несколько превышающей значение 10%. Из сопоставления кривых, представленных в диссертации, по изменению коэффициентов прилипания в зависимости от отношения исходных геометрических размеров было обнаружено некоторое смещение в сторону оси ординат кривой, построенной на основе результатов по осадке образцов с $d/h = 1$. Последнее свидетельствует о том, что, несмотря на одинаковые степени деформации, значения коэффициентов прилипания отличаются по величине. Так, если при деформировании проб с $d/h = 0,5$ при $\epsilon = 70\%$ коэффициент прилипания имеет размерность $k_{np} = 0,2$, то при той же величине обкатки, но с $d/h = 1$ этот коэффициент равен всего 0,01.

Исследование характера изменения площади прилипания при пластическом асимметричном скатии цилиндрических образцов, имеющих отношение $d/h = 2$ показало, что скольжение при этих условиях опыта начинает появляться по достижении степени деформации 3% и уже при $\epsilon = 30\%$ коэффициент прилипания равен всего 0,15. В случае же обкатки, соответствующих 40%

происходит исчезновение области прилипания с одновременным возрастанием скольжения частиц металла относительно поверхности наклонных бойков. При этом перемещение металла развивается более интенсивно с $d/h = 2$, следовательно активация скольжения наступает с ростом отношений исходного диаметра к высоте.

Как было сказано выше, зона прилипания в процессе деформирования с увеличением обкатки расщепляется на две доли. Изменение расщепления характеризуют графики трансформации зоны прилипания. Сопоставление кривых изменения коэффициента трансформации зоны прилипания, полученных при обкатки образцов с различными d/h показало, что момент начала и полное расщепление наблюдаются раньше при деформировании более низких образцов. Так, если при обкатки проб с отношением диаметра к высоте 0,5 начало и конец расщепления происходят соответственно при $\epsilon = 10\%$ и $\epsilon = 40\%$, то в случае скатии образцов, имеющих $d/h = 2$ уже с самого начала деформирования происходит расщепление, которое заканчивается при степени деформации равной 20%. Следовательно, увеличение отношений исходных диаметра образца к его высоте ускорит процесс расщепления зоны прилипания, при прочих равных условиях.

При исследованиях установлено, что наряду с образованием сложной фигуры зоны прилипания, последняя с увеличением степени деформации мигрирует в сторону меньшей высоты образца. Причем, интенсивность перемещения зоны прилипания также,

как и развитие скольжения зависит от отношения исходных геометрических размеров. Как видно из представленных в диссертации графиков, степень деформации, соответствующая началу миграции зоны прилипания, различна при разных отношениях диаметра к высоте образца. Если при $d/h = 0,5$ начало миграции имеет место при $\epsilon = 25-30\%$, то при $d/h = 2$ соответственно $8-10\%$. Неодинаковы величины степени осадки и для момента выхода зоны прилипания за пределы очага деформации. Так, если для отношения $0,5$ момент выхода зоны прилипания фиксируется примерно при $\epsilon = 85\%$, то с $d/h = 2$ значение обжатия равно 40% .

Следовательно, на основе рассмотрения результатов, полученных при асимметричном пластическом скатии наклонными бойками цилиндрических образцов с различными исходными геометрическими размерами можно утверждать, что при увеличении отношений d/h начало скольжения и последующее развитие всех сопутствующих явлений в очаге деформации (миграция, расщепление и полное исчезновение зоны прилипания) происходит при меньших степенях деформации, при прочих равных условиях.

Интересны также закономерности, выявленные нами при изменении чистоты поверхности инструмента. В этом случае при $d/h = 1$ и угле наклона 5° , скольжение начинает появляться (обработка рабочих поверхностей бойков соответствует 6 классу чистоты) при степени деформации 10% . В то же время данные, полученные при скатии между наклонными бойками, поверхность которых обработана по восьмому классу чистоты, свиде-

тельствуют о том, что скольжение наблюдается при $\epsilon = 2,5\%$. Рассматривая данные, полученные при степени деформации 20% можно утверждать, что при использовании бойков, имеющих обработку рабочих частей 6 класса чистоты, коэффициент прилипания равен $k_{np} = 0,84$, а при 8 классе — $k_{np} = 0,42$. Иначе говоря, в последнем примере он почти в два раза меньше. При деформировании проб между бойками, чистота которых равна 6 классу мы наблюдаем полное скольжение при степени деформации 75% . В случае же осадки инструментом с чистотой поверхности 8 класса, полное скольжение фиксируется уже при $\epsilon = 45\%$. Все это свидетельствует о том, что изменение контактных условий существенно влияет на перемещение металла в очаге деформации. Кроме того с улучшением чистоты поверхности инструмента повышается интенсивность расщепления и миграции зоны прилипания, при прочих равных условиях.

Следует также остановиться на развитии скольжения при изменении угла наклона рабочих частей инструмента. В диссертации представлены данные в виде графиков изменения коэффициентов прилипания от угла наклона бойков при постоянных значениях чистоты поверхности плит и отношений d/h . Так, при отношении диаметра к высоте равным единице и $\alpha = 2,5^\circ$ значению степени деформации 20% соответствует коэффициент прилипания $k_{np} = 0,5$. При тех же условиях опыта, но угле наклона 10° коэффициент прилипания равен $0,3$. Полное скольжение наблюдается при $\alpha = 2,5^\circ$ и $\alpha = 10^\circ$ соответственно при $\epsilon = 50\%$ и 30% . Изложенное свидетельствует о том, что увеличение угла

наклона контактной поверхности инструмента способствует более интенсивному развитию скольжения, а следовательно, уменьшению площади прилипания при значительно меньших обжатиях.

Данные, полученные при асимметричном сжатии образцов, изготовленных из латуни, свинца и алюминия, говорят о влиянии материала проб с разными физико-механическими свойствами на изменение коэффициентов прилипания, миграции и трансформации. А именно, с увеличением их сопротивления деформированию, при одинаковых условиях опыта, возникает более интенсивное скольжение частиц металла относительно поверхности инструмента, а также более раннее начало и конец расщепления и миграции последней в сторону меньшей высоты заготовки.

Таким образом, при асимметричном сжатии цилиндрических образцов выявлены основные закономерности изменения развития скольжения и прилипания на контактной поверхности очага деформации.

Причем, с увеличением степени деформации, отношения исходных размеров диаметра к высоте, угла наклона бойков, сопротивления деформированию, а также с повышением чистоты поверхности инструмента возрастает интенсивность развития скольжения, миграции и расщепления зоны прилипания.

б. Сжатие прямоугольных образцов наклонным инструментом

Следующим этапом в проведении экспериментов является асимметричная осадка прямоугольных образцов наклонными бойками. При этом исследовались основные закономерности соотноше-

ний зон скольжения и прилипания на контактной поверхности очага деформации. Как и в этом случае сжатия цилиндрических проб происходит изменение скольжения и прилипания, наблюдается расщепление последней на две доли и миграция ее в сторону меньшей высоты проб.

В процессе проведения экспериментов и полученных по ним данных установлено, что с ростом степени деформации и увеличением отношений исходных геометрических размеров δ/h и ϵ/h интенсивность к скольжению повышается. Причем, также как и в случае сжатия цилиндрических образцов, коэффициент прилипания при малых отношениях δ/h и ϵ/h по своему численному значению близок к единице, т.е. зона прилипания охватывает всю контактную поверхность образцов. В диссертации представлены графики, отображающие закономерности изменения коэффициентов прилипания, миграции и трансформации. Увеличение отношений геометрических размеров влияет на миграцию и расщепление их площади прилипания, а именно, убыстряет процесс начала и конца расщепления площади прилипания и миграцию ее в сторону меньшей высоты заготовки.

Варьирование шероховатости рабочих частей бойков, при прочих равных условиях, также вносит заметное влияние на изменение зон скольжения и прилипания. Наиболее значительное скольжение наблюдается при использовании инструмента с чистотой обработки, соответствующей 8 классу. При указанных условиях опыта, уже при степени деформации равной 2,5% зона прилипания охватывает 73% всей контактной поверхности. В то вре-

мя как при сжатии на бойках 4 и 6 классов чистоты подобное положение имеет место при обжатиях, равных соответственно, 18% и 32%.

При этом, безусловно, не следует отбрасывать и величину наклона контактных поверхностей инструмента. Из сопоставления кривых, представленных в диссертации, характеризующих изменение коэффициентов прилипания, миграции и трансформации от угла наклона бойков, видно, что наименьшее скольжение частиц металла относительно поверхности инструмента наблюдается при $\alpha = 2,5^\circ$. Дальнейшее же увеличение угла наклона ведет к интенсивному развитию скольжения, а также сопутствующих явлений, расщеплению и миграции.

Вывод о том, что применение материала образцов с повышенным значением сопротивления деформирования активизирует интенсивность развития скольжения и других явлений, наблюдаемых на контактной поверхности, подтвердился и при сжатии прямоугольных проб наклонными бойками.

В реальных условиях часто встречаются случаи пластического деформирования заготовок, у которых мгновенный очаг деформации охватывает сравнительно небольшую часть обрабатываемого металла. Остальная же его часть непосредственно под воздействием инструмента не находится. Эти свободные части, названные А.И.Целиковым внешними частями, взаимодействуют с очагом деформации, оказывая влияние на напряженное и деформированное состояние тела. Поэтому установление влияния внешних частей на соотношение зон скольжения и прилипания при пласти-

ческой осадке прямоугольных образцов наклонным инструментом представляет определенный интерес. При этом исследовались образцы, имеющие небольшую протяженность внешних частей и пробы с внешними частями, превышающими очаг деформации.

Данные, приведенные в диссертации свидетельствуют о том, что в случае сжатия наклонными бойками образцов с внешними частями также наблюдается расщепление площади прилипания с одновременной миграцией ее в сторону меньшей высоты заготовки. Однако, изменение коэффициентов прилипания, миграции и трансформации в последнем случае имеют некоторые отличительные особенности. В первую очередь это проявляется в уменьшении интенсивности развития скольжения, в случае использования для осадки проб с внешними частями. Так, при обжатии образцов, имеющих одинаковые отношения $v/h = 1,33$, $e/h = 2$ и $\alpha = 5^\circ$ до степеней деформации 40%, в случае деформирования заготовок без внешних частей, зона прилипания составляет 20% от всей площади контакта, в то время как при наличии внешних частей в 5 мм - более 25%.

Отмеченный факт свидетельствует о том, что даже незначительная протяженность внешних частей оказывает влияние на трансформацию зон скольжения и прилипания. Это отражается и на сопутствующих скольжению явлениях, расщепления области прилипания и ее миграции.

Как выяснилось при опытах, в случае пластического асимметричного сжатия с внешними частями все перечисленные явления развиваются менее интенсивно по сравнению с тем, как это происхо-

дит при деформировании обычных прямоугольных образцов.

Сказанное лишней раз подтверждает правильность литературных данных о различии протекания пластических формоизменений, развития явлений на контакте между металлом и наклонным инструментом в случае отсутствия или наличия у образцов частей, расположенных вне пределов очага деформации.

в. Сжатие прямоугольных образцов цилиндрическим инструментом

Последним этапом опытов является асимметричное сжатие образцов бойками, имеющими цилиндрическую контактную поверхность. При использовании такой формы инструмента, очаг деформации представляет вогнутую поверхность, одна часть которой благодаря вырезу, с достаточным приближением соответствует мгновенному очагу деформации при прокатке.

На основе рассмотрения результатов, полученных при пластической осадке между цилиндрическими бойками образцов с предварительной выемкой в центральной части, с различными геометрическими размерами можно утверждать, что при увеличении отношения длины очага деформации к средней высоте начало скольжения и последующее развитие всех явлений на контактной поверхности (интенсивность перемещения металла, расщепление и миграция зоны прилипания в сторону меньшей высоты образца и полное исчезновение этой зоны) происходит при меньших значениях степеней деформации. Причем, в случае исследования образцов с $l/h_{cp} = 1,5$ наиболее значительное скольжение наблюдается при использовании инструмента с чистотой обработки, соответствующей восьмому классу.

Развитие скольжения при пластической осадке образцов цилиндрическими бойками отличается от сжатия прямоугольных заготовок наклонным инструментом. Из сопоставления кривых изменения некоторых коэффициентов при пластическом деформировании наклонными и цилиндрическими бойками видно, что в случае использования образцов с $l/h_{cp} = 1$ и чистоте поверхности бойков, равном 8 классу, начало скольжения при сжатии наклонным инструментом наблюдается при степени деформации 2,5%, коэффициент прилипания при этом равен $K_{np} = 0,91$. Дальнейшее развитие пластического деформирования увеличивает в том и другом случаях интенсивность скольжения, а также миграцию зоны прилипания.

3. Анализ результатов эксперимента

Итогом значительных по объему исследований, направленных на установление кинематической картины течения металла в очаге деформации в условиях последовательного приближения от одноосного осесимметричного сжатия к пластическому деформированию прокаткой, явилось установление основных закономерностей изменения контактных зон скольжения и прилипания.

При этом определены соотношения зон скольжения и прилипания в зависимости от шероховатости рабочих частей инструмента, отношения исходных геометрических размеров и углов наклона. Кроме того, установлено, что зона прилипания в процессе асимметричного сжатия расщепляется на две доли и одновременно мигрирует в сторону меньшей высоты образца.

Причинами, вызывающими расщепление является в первую очередь неравномерность высотной деформации вдоль наклона образцов. В то же время ввиду того, что угол наклона различных радиусов по периметру заготовок также неодинаков, различными являются радиальные и высотные составляющие деформации. Далее, учитывая, что в сторону меньшей высоты образцов степень деформации имеет большую величину, то и радиальные перемещения именно в этом направлении должны быть максимальными. Кроме того, при пластическом деформировании наклонными бойками течению металла в сторону раскрытия клина способствует, выталкивающая образец из бойков, горизонтальная составляющая нормальной силы.

Следующей причиной, обуславливающей большее смещение частиц металла в сторону раскрытия клина, является количественное преобладание объема металла на стороне большей высоты образца над областью, расположенной со стороны его меньшей высоты. Все указанное, в свою очередь, способствует тому, что течение металла в направлении наклона развивается интенсивней, чем это имеет место в поперечном направлении. Эта совокупность причин и вызывает интересное явление лепесткообразования зоны прилипания.

Большое количество экспериментальных данных, позволило выразить графически зависимости изменения коэффициентов прилипания, миграции и расщепления зоны прилипания. На основе этих графиков построены обобщенные диаграммы в координатах отношения исходных геометрических размеров и степени деформации.

ции. В этом случае из расчетных таблиц и кривых изменения коэффициентов прилипания берутся для разных отношений геометрических размеров предельные значения обжатий, при которых поверхность контакта представляет собой сплошную зону прилипания. С учетом этих данных на диаграмме откладываются ординаты с абсциссами предельных величин степеней деформации. Через точки их пересечения с соответствующими горизонталями значений отношений исходных геометрических размеров, проводится главная кривая. Область обобщенной диаграммы, расположенной влево от нее, определяет сплошную зону прилипания по всей контактной поверхности деформируемых тел при разных отношениях исходных размеров, но в заданных пределах относительной деформации.

Следующим этапом исследования является нахождение величин степеней деформации, при достижении которых на контакте сохраняется зона прилипания меньше одного процента. В последнем случае, как и при построении первой части диаграммы, через точки пересечения ординат с горизонталями проводится вторая плавная кривая. При этом, построенная область диаграммы, которая расположена правее второй кривой, характеризует полное скольжение частиц металла по всей контактной поверхности образцов.

Область диаграммы, заключенная между двумя крайними кривыми, является промежуточной, т.е. зоной, в которой наблюдается и скольжение, и прилипание.

Следует особо заметить, что если в случае осадки плос-

копараллельными плитами происходит несложное изменение этих зон, то в случае асимметричного пластического сжатия, наблюдается расщепление и миграция зоны прилипания в сторону меньшей высоты пробы. Последние два явления усложняют процесс асимметричного сжатия и тем самым вызывают необходимость отыскания аналитических решений для определения соотношений зон скольжения и прилипания, а также трансформации расщепления и миграции зоны прилипания. Как отмечалось выше, с увеличением степени деформации и соотношения исходных геометрических размеров образцов, может наблюдаться как рост, так и сокращение зоны прилипания. Эксперименты показывают, что интенсивность течения металла проявляется значительно сильнее при сжатии образцов с большим отношением геометрических размеров, с увеличением угла наклона бойков и степени деформации. Отмеченные факты учитывались при составлении эмпирических выражений для каждого случая асимметричного сжатия цилиндрических и прямоугольных образцов наклонными бойками и инструментом, имеющим цилиндрическую контактную поверхность.

В нашем исследовании для случая сжатия цилиндрических наклонных образцов эмпирическая формула имеет следующий вид:

$$k_{np} = \left(1 - \varepsilon^{\pi^2 \mu \sqrt{1+\varepsilon} + \alpha \frac{h}{d}} \right)^{2\pi} \quad (2)$$

где k_{np} - коэффициент прилипания, ε - степень деформации, μ - коэффициент трения, α - угол наклона бойков, h/d - исходное отношение высоты к диаметру образца.

Если значение коэффициента внешнего трения равно нулю,

то абсолютная площадь прилипания также равна нулю. При подстановке в выражение (2) значения $\varepsilon = 0$ коэффициент прилипания равен единице, т.е. контактная поверхность представляет собой полностью зону прилипания. Кроме того, подставляя значения угла наклона и отношения h/d , формула дает результаты близкие к экспериментальным.

С учетом анализа эмпирических формул для определения коэффициентов прилипания в любом случае асимметричного сжатия предложена обобщенная эмпирическая зависимость, которую можно применить для более сложного пластического деформирования прокатки:

$$k_{np} = \left(1 - \varepsilon^{\mu K_1 h_1 h_2} \right)^m \quad (3)$$

где μ - коэффициент трения, $K_1 = \sqrt{1+\varepsilon}$ - для случая сжатия цилиндрических образцов плоскопараллельными плитами,

$K_1 = \sqrt{1+\varepsilon} + \alpha$ - для случая осадки наклонным инструментом, бойками, имеющими цилиндрическую контактную поверхность и про-

катки, α - угол наклона инструмента или захвата при про-

катке, $h_1 = \frac{10h}{d}$ - для случая пластического деформирования цилиндрических тел, $h_1 = \frac{10h_e}{2.8 \cdot 2.5}$ - для случая сжатия и прокат-

ки прямоугольных образцов, m - коэффициент колеблющийся в пределах 6-8, в зависимости от напряженного состояния, h_2 - коэффициент, учитывающий кинематику процесса прокатки, колеблется в пределах 1-0,5.

Проанализировав факторы, влияющие на миграцию зоны прилипания, мы предлагаем обобщенную эмпирическую зависимость для

определения перемещения зоны прилипания в сторону меньшей высоты заготовки, т.е. определения коэффициента миграции:

$$K_M = (\epsilon^m \cdot n_1 \cdot h_2)^m \quad (4)$$

Коэффициенты, входящие в выражение (4), имеют такие же значения, как и в формуле определения коэффициента прилипания (3).

Таким образом, многочисленные эксперименты по определению кинематической картины, происходящей в очаге деформации при моделировании процесса прокатки, позволили получить основные закономерности изменения соотношений зон скольжения и прилипания. Опыты показали не только качественную картину явлений, но дали возможность оценить количественно площади этих зон при разных степенях деформации, чистоты поверхности и угла наклона инструмента, отношений исходных геометрических размеров образцов. Используемый метод последовательного приближения от одноосного сжатия к пластическому деформированию прокаткой, позволил непосредственно приблизиться к этому сложному явлению. Благодаря предложенным эмпирическим зависимостям можно аналитически установить значения коэффициентов прилипания, миграции и трансформации и благодаря введению поправочных величин перенести изменения происходящих явлений на пластическое деформирование металлов прокаткой.

Основные выводы

На основе результатов исследований, полученных при условии последовательного приближения от одноосного сжатия к пластическому деформированию прокаткой, можно сделать следующие основные выводы:

1. Исследования кинематических условий при асимметричном сжатии показало, что в результате влияния касательных сил, различия углов наклона инструмента и степени деформации в разных точках, в очаге деформации наблюдается неоднородное деформированное состояние, создающее условия для неравномерного перемещения металла образцов во всех направлениях. При этом наиболее интенсивное перемещение металла наблюдается вдоль наклона рабочих частей бойков.

2. Вследствие неодинакового перемещения металла в разных местах очага деформации контактная зона прилипания имеет сложное очертание и с увеличением степени обжатия расщепляется на две доли.

3. Экспериментально установлено, что с одновременным расщеплением зоны прилипания, последняя мигрирует в сторону меньшей высоты образца.

4. Во всех случаях асимметричного сжатия увеличение степени деформации и отношения исходных геометрических размеров влечет за собой интенсивное развитие скольжения и сопутствующих явлений, миграции и расщепления зоны прилипания. При увеличении угла наклона инструмента и улучшении чистоты поверх-

ности бойков, происходит быстрое сокращение зоны прилипания, а миграция и расщепление этой зоны наступает при меньшем значении степени деформации, при прочих равных условиях. Деформирование образцов из металлов с различными физико-механическими свойствами показало, что коэффициент прилипания уменьшается быстрее в случае осадки проб с большим сопротивлением деформирования.

5. Созданы обобщенные диаграммы для определения соотношения зон прилипания и скольжения.

6. Введено представление о трех коэффициентах, характеризующих закономерности течения металла на контактной поверхности: а) коэффициент прилипания, б) коэффициент миграции зоны прилипания, в) коэффициент трансформации зоны прилипания.

7. Наличие внешних частей образцов сказывается на изменении соотношений зон скольжения и прилипания, а также на миграцию и расщепление зоны прилипания. Как правило, все перечисленные явления при наличии внешних частей развиваются менее интенсивно по сравнению с тем, как это происходит при исследовании обычных прямоугольных образцов.

8. Применение образцов с предварительной выемкой, очаг деформации которых с достаточным приближением соответствовал мгновенному очагу деформации, наблюдающемуся при прокатке, позволяет приблизить представления о закономерностях течения металла при этом регулярном процессе пластического деформирования.

9. Для исследованных случаев асимметричного сжатия пред-

ложены эмпирические формулы для определения коэффициентов прилипания, миграции и трансформации. На основе этих зависимостей созданы обобщенные эмпирические формулы, которые рекомендуются для случая пластического деформирования прокатки.

Основные материалы по диссертационной работе доложены:

1. На научной конференции по автоматизации производственных процессов. Алма-Ата, октябрь, 1968 г.

2. На научно-производственной конференции ФПИ, Фрунзе, апрель, 1968 г.

3. На второй республиканской конференции по вопросам общей и прикладной физики, Алма-Ата, октябрь, 1969 г.

4. На XV научно-производственной конференции ФПИ, Фрунзе, апрель, 1969 г.

5. На XVI научно-производственной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения В.И.Ленина, апрель, 1970 г.

6. На научном семинаре лаборатории металлофизики ИЯФ АН Каз. ССР, июнь, 1971 г.

7. На научном семинаре кафедр Технологии металлов и строительной механики Фрунзенского политехнического института, 20 мая, 1971 г.

Основное содержание работ опубликовано в статьях:

1. Греков А.М., Свиденко В.Н., Пресняков А.А., Березкин В.Г., Джангиров Э.В. О соотношении зон скольжения и прилипания при осадке. Сб. трудов ФПИ, вып.35, Фрунзе, 1969.

2. Березкин В.Г., Джангиров Э.В., Греков А.М. Влияние контактного трения на уширение при вытяжке и прокатке. Труды ФТИ, вып.35, Фрунзе, 1969.

3. Джангиров Э.В. Закономерности скольжения и прилипания металла на контакте цилиндрических образцов при осадке наклонными бойками. Тезисы XVI научно-производственной конференции ФТИ, Фрунзе, 1970.

4. Березкин В.Г., Джангиров Э.В., Свиденко В.Н. К определению степени деформации при осадке наклонными бойками. "Вестник АН Каз.ССР", 1971, № 6.

5. Свиденко В.Н., Греков А.М., Пресняков А.А., Джангиров Э.В., Шкарлет В.И. Автоматическое измерение контактных сил трения методом сдвига. Сб. "Автоматизация производственных процессов", Алма-Ата, изд-во, "Наука", 1970.

6. Джангиров Э.В., Свиденко В.Н., Методы определения границ зон скольжения и прилипания при прокатке. Сб. "Влияние предварительной деформации на свойства металлов и сплавов", Алма-Ата, изд-во "Наука", 1971 г.

7. Свиденко В.Н., Пресняков А.А., Джангиров Э.В., Греков А.М. Трансформация контактных зон при обкатки цилиндрических проб наклонным инструментом. Сб. трудов ИЯФ АН Каз.ССР "Строение очага деформации при пластических формоизменениях металлов осадкой и прокаткой". М., ВИНТИ, 1971 г.

8. Джангиров Э.В., Свиденко В.Н., Пресняков А.А. Кинематические условия в очаге деформации при скатии прямоугольных образцов наклонными и цилиндрическими бойками. Сб. трудов ИЯФ АН Каз.ССР "Строение очага деформации при пластических формоизменениях металлов осадкой и прокаткой". М., ВИНТИ, 1971.

ПОДПИСАНО В ПЕЧАТЬ 27/VIII-1971 г. ФОРМАТ БУМАГИ
60×90 1/16. ОБЪЕМ 2 л. л.
Д — 01295. ЗАКАЗ 2064. ТИРАЖ 200 ЭКЗ.
Г. ФРУНЗЕ, ТИПОГРАФИЯ АН КИРГИЗ. ССР
УЛ. ПУШКИНА, 144