

ДЕФОРМИРОВАНИЕ С КОМБИНИРОВАННЫМ НАГРУЖЕНИЕМ

DEFORMATION WITH COMBINED LOADING

Буркин С.П.

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, spb@mtf.ustu.ru

Introduced the concept of a combined loading of metal forming. As an example of effective use of combined loading considered: upsetting with twisting, rolling in the stands with individual hydraulic cylinders, drawing with counterstrain, continuous rolling strip with tension between the stands.

Keywords: combined loading, upsetting with torsion, drawing with counterstrain, individual hydraulic, continuous rolling.

В современной теории пластичности введена физически и математически обоснованная классификация процессов нагружения материала, согласно которой все способы приложения внешних нагрузок сводимы либо к простому, либо к сложному нагружению.

С достаточной строгостью к случаям простого нагружения можно отнести растяжение тонкой пластины, осевое растяжение или кручение тонкостенного цилиндра, деформирование тонкостенного цилиндра под действием внутреннего давления и т.п.

За редким исключением все процессы при обработке металлов давлением должны быть отнесены к случаям сложного нагружения пластически деформируемых тел.

Первые систематические исследования закономерностей упруго-пластической деформации металлов при сложном нагружении начали появляться в 40-х гг. XX в. Обзор этих работ по 1948 г. был приведен в книге А. Надаи [1], а после 1954 г. – в работах А.М. Жукова [2-5]. Проводя анализ состояния исследований в области сложного нагружения при пластическом деформировании металлов, можно выделить четыре основных направления, по которым ведутся исследования:

- проверка и дальнейшее развитие существующих теорий пластичности;
- исследование пластических и прочностных характеристик металла при сложном нагружении;
- изучение закономерностей контактного трения при пластической деформации;
- совершенствование технологии обработки металлов давлением.

Поскольку исследования процессов обработки металлов давлением, рассматриваемые в настоящей работе, имеют технологическую направленность, обзор работ по сложному нагружению, касающихся проверки и дальнейшего развития существующих теорий пластичности, не рассматривается.

В изложении материалов настоящей работы будем различать процессы с «обычным» и «комбинированным» нагружением. Процессы ОМД с обычным нагружением осуществляются при наиболее простой схеме приложения внешних нагрузок: за счет действия только сжимающей силы, крутящего момента, тягового усилия и т.д. К ним относятся обычная осадка, прокатка, волочение, пресование, штамповка и т.д. К

процессам с комбинированным нагружением относим такие процессы, как осадка со сдвигом, прокатка с рассогласованием скоростей валков, осадка с кручением, волочение с противонапряжением, пресование с подвижным контейнером, штамповка с противодействием и т.д.

Понятиями комбинированного и обычного приложения внешней нагрузки будем определять характер прилагаемых к инструменту и заготовке усилий, под действием которых осуществляется пластическая деформация. Понятия простое и сложное нагружение, как известно [6], определяют характер изменения компонентов напряжений в объеме деформируемого тела, развивающихся под действием той или иной внешней нагрузки.

Так как между деформирующими усилиями и напряженным состоянием в объеме существует сложная взаимосвязь, по характеру внешних усилий трудно судить о виде нагружения и наоборот. Однако можно полагать, что при комбинированном приложении внешней нагрузки отклонения от простого нагружения более значительны, чем при обычном приложении нагрузки. Поэтому при рассмотрении вопросов, касающихся, прежде всего, влияния характера внешней нагрузки на механические свойства деформированного материала, следует учитывать особенности сложного нагружения.

В общепринятой классификации все процессы пластической деформации подразделяются по способу нагружения. Комбинированное нагружение не может быть отнесено ни к простому, ни к сложному, поскольку может быть и тем и другим. В настоящей работе, которая была начата еще в 1966 г. под руководством И.Я. Тарновского, под комбинированным нагружением понимается такое, при котором энергия к деформируемому телу подводится двумя или более потоками управляемой интенсивности. В этом случае может быть реализована деформация в условиях, как сложного нагружения, так и близкого к простому.

В частности, волочение с противонапряжением легко представимо как простое волочение предварительно упруго растянутой заготовки. Натяжение и само волочение выполняются отдельными приводами, и мощности как противонапряжения, так и самого волочения могут независимо варьироваться.

При комбинированном нагружении привод может быть один, но обязательно должен существовать элемент линии привода, позволяющий общий поток подводимой к деформируемому телу энергии разделять в произвольной пропорции на частные потоки, приводящие в движение исполнительные органы.

Известные из литературы процессы с «активным действием сил трения» являются частным случаем ОМД с комбинированным нагружением. Трение – это лишь способ передачи энергии от исполнительного органа деформируемому телу.

Деформирование с комбинированным нагружением позволяет существенно расширить технологические возможности традиционных способов ОМД. Для многих процессов может быть найдена такая комбинация внешних нагрузок, при которой процесс оптимизируется по какому-либо параметру. Например, существует такая величина противонапряжения, при которой мощность многократного непрерывного волочения минимальна при сохранении заданного запаса прочности материала во всех проходах.

В развитии идеи комбинированного нагружения исследовались и оптимизировались, а также создавались новые способы деформации, развивающие технологию ОМД и порождающие новые конфигурации машин. Результаты теоретического и экспериментального анализов таких способов обработки, как волочение, осадка и штамповка с кручением, осадка со сдвигом, радиальная обжатие и многоножевая разрезка с поперечным сдвигом, прессование с подвижной матрицей, валковая высадка с рассогласованием скоростей валков, рубка с растяжением и некоторые другие, подробно представлены в публикациях.

В традиционных способах пластического формоизменения чаще всего используются агрегаты с одним основным приводом, от которого энергия через кинематически связанные исполнительные органы передается посредством деформирующего инструмента к обрабатываемой заготовке. Напряженное деформированное состояние в этом случае определяется заданными граничными условиями и свойствами деформируемого материала. Граничные условия, как правило, заранее известны и либо остаются в течение всего акта деформирования постоянными, либо программно изменяются.

Совершенно иная ситуация при комбинированном нагружении, когда кинематические или силовые граничные условия могут изменяться в процессе деформации по заранее не известному и, следовательно, не регламентируемому закону. Легко понять, что последний может быть зависим от напряженно-деформированного состояния и температурно-скоростных условий ведения процесса.

Это положение достаточно хорошо иллюстрируется гидравлическими моделями процессов обработки с комбинированным

нагружением. На рис. 1 в качестве примера рассматривается известный [7] способ осесимметричной осадки с кручением.

Верхняя плита 1 с помощью гидроцилиндра ГЦ осуществляет осадку заготовки 2 на поворотной плите 3, приводимой во вращение гидромотором ГМ.

Энергия для осуществления деформации подводится двумя потоками жидкости высокого давления. Кинематические условия осадки в этом случае определяются соотношением расходов в напорных линиях ГЦ и ГМ. Естественно, что расход в линии уменьшается при возрастании нагрузки. В процессе осадки соотношение расходов в напорных гидролиниях автоматически обеспечивает минимум потребляемой мощности. Это соотношение в нестационарном процессе деформации, которым является рассматриваемая осадка, не обязано быть постоянным. Таким образом, граничные условия могут непрерывно меняться в течение акта деформирования, обеспечивая в каждый момент минимизацию энергозатрат на процесс.

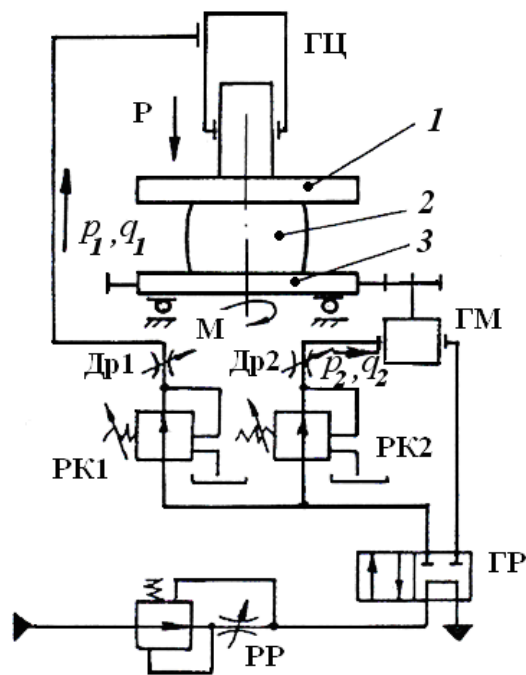


Рис. 1. Гидравлическая модель процесса осадки с кручением:

1 – верхняя подвижная плита; 2 – заготовка; 3 – нижняя поворотная плита

Несмотря на условности примененных гидроаппаратов в приведенной схеме, гидравлическая модель обладает универсализмом в плане отображения приводов любого конструктивного типа. Редукционные клапаны РК1 и РК2 в напорных гидролиниях имитируют силовые возможности привода (момент, усилие); дроссели Др1 и Др2 – потери мощности в соответствующих линиях привода, т.е. определяют КПД привода; регулятор расхода РР – мощность приводов деформирующего агрегата.

Полная мощность деформации N (мощность внутренних сил и мощность сил контактного трения) равна полезной мощности потоков жидкости

$$N = p_1 \cdot q_1 + p_2 \cdot q_2,$$

где p_1 и p_2 – давление на выходах соответственно ГЦ и ГМ;

q_1 и q_2 – расходы рабочей жидкости в напорных линиях ГЦ и ГМ.

При решении задач расчета напряженно-деформированного состояния в случае комбинированного нагружения соотношение расходов q_1 и q_2 должно варьироваться наравне с параметрами напряженного и деформированного состояния. При этом найденные действительные поля скоростей течения и напряжений должны удовлетворять условию минимума мощности внешних сил.

В рассмотренном примере энергия от привода подводится двумя потоками, что позволяет такой процесс с комбинированным нагружением называть двухпоточным. Усложнение комбинации нагружения порождает трех- и n -поточные процессы. Если в вариационной постановке задач для двухпоточных схем нагружения достаточно ввести дополнительный варьируемый параметр q_1/q_2 , то для n -поточных процессов постановка задачи может оказаться неизмеримо труднее, поскольку минимизация полной мощности деформации является локальной. Глобальный минимум мощности и, следовательно, действительные поля скоростей и напряжений определяются в результате поиска такого сочетания q_1, \dots, q_n , при котором минимизируется полезная мощность привода.

Гидравлические модели процессов с комбинированным нагружением оказываются полезными в экспериментальном изучении возможных подмножеств векторного пространства (q_i). Это существенно облегчает постановку задач расчета НДС (напряженно-деформированное состояние) подобных процессов и допускает процедуру перебора возможных векторов (q_1, \dots, q_n).

Интересным примером комбинирования нагружений является прокатка с индивидуальным приводом валков. Двухпоточная схема комбинированного нагружения для прокатной клетки с гидроприводом показана на рис. 2. Валки 2, между которыми перекачивается заготовка 1, приводятся индивидуальными гидромоторами ГМ1 и ГМ2, параллельно подключенными через гидрораспределитель ГР к напорной линии. Дроссели Др1 и Др2 позволяют выровнять гидрораспределение в линиях подачи рабочей

жидкости к гидромоторам. Мощность привода устанавливается регулятором расхода РР, а нагрузочная способность – редуцирующим клапаном РК.

Как известно из классической теории прокатки, симметричная прокатка возможна лишь при полной симметрии очага деформации. Обеспечить абсолютное равенство контактных сил трения на обоих валках и равномерное распределение механических свойств металла по сечению заготовки практически невозможно, поэтому при согласовании скоростей валков с помощью шестеренной клетки или подключении индивидуальных электродвигателей по схеме «электрического вала» симметричная, особенно горячая, прокатка чаще всего не осуществима без проводковых устройств.

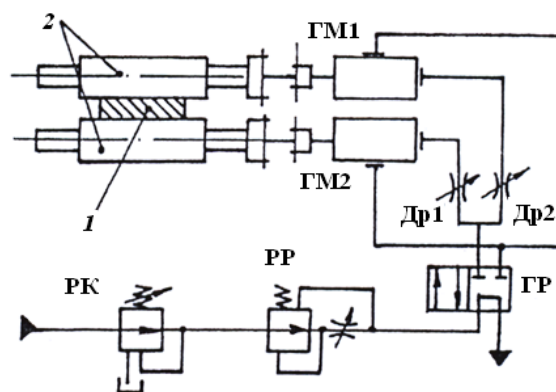


Рис. 2. Модель процесса прокатки с индивидуальным гидроприводом валков (объяснения – в тексте)

Изгиб полосы на выходе требует дополнительных затрат энергии, поэтому, когда используется двухпоточная гидросхема привода, реализуются минимизация потребляемой мощности и симметризация процесса за счет рассогласования скоростей валков. Автоматическая компенсация случайной асимметрии очага деформации, как при плоской, так и при фасонной прокатке, реализовалась во всех случаях опытной прокатки на опытно-промышленной клетке с индивидуальным гидроприводом. Аналогичной конструкцией привода снабжена четырехвалковая калибровочная клетка в линии производства железнодорожных костылей одного из заводов металлоконструкций Свердловской области.

Многopotочная система привода в применении для самонастройки непрерывного прокатного блока показана на рис. 3. Все n клетей блока снабжены индивидуальными гидроприводами валков ГМ₁, ГМ₂. При вводе полосы в блок переходят на согласованную по скоростям схему привода переключением гидрораспределителя ГР2. Пропорциональное вытяжкам соотношение расходов рабочей жидкости устанавливается делителем потока. После заправки блока переходят путем переключения ГР2 на рассогласованную схему привода, при которой после настройки

редукционных клапанов PK_i в соответствии с нагрузочной диаграммой блока минимизируется полная потребляемая мощность гидропривода за

счет как рассогласования скоростей валков в клетях, так и ввода межклетевых натяжений.

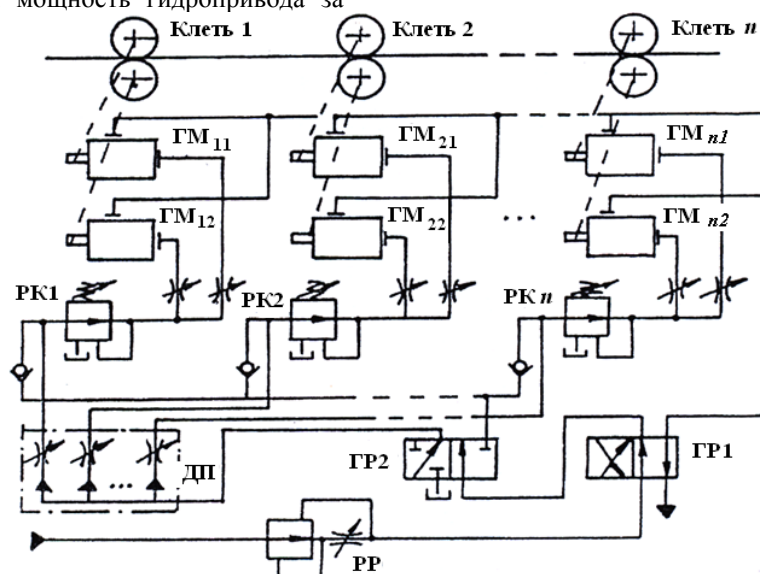


Рис. 3. Гидравлическая схема привода непрерывного прокатного блока

Подобная многониточная схема комбинированного нагружения при сортовой и полосовой непрерывной прокатке заложена в конструкции привода десятиклетевых блока литейно-деформационного комплекса.

Если приведенную многониточную схему видоизменить, устранив разветвление общего потока рабочей жидкости и сформировав независимо управляемые потоки, то правильная (трудно в этом случае говорить об оптимальной) настройка потребует решения задачи расчета НДС во всех прокатных проходах с учетом межклетевых натяжений, что вряд ли возможно на актуальном этапе развития теории прокатки.

Технологически интересен опыт использования комбинированного нагружения в операцияхковки и штамповки. Процессы осадки и штамповки с кручением уже достаточно подробно описаны в работе [7].

Созданный на одном из заводов металлоконструкций агрегат для производства железнодорожных костылей реализует высадку головок костылей способом прокатки с рассогласованием скоростей валков и разделением заготовки на два костыля с одновременным их заострением способом рубки с растяжением клиновыми штампами. Двухпоточная схема подвода энергии к зоне деформации при разделении костылей кроме минимизации работы рубки обеспечивает отсутствие как уширения, так и утяжки металла. Это можно понять, предполагая, что схема деформации без уширения и утяжки характеризуется минимальной интенсивностью деформаций сдвига и, следовательно, требует минимальных затрат энергии. Эта двухпоточная схема комбинированного нагружения достаточно проста и позволила частично аналитически, частично экспериментально, установить

оптимальное соотношение скоростей рубки и растяжения на всех этапах разделения. Результатом анализа стало существенное упрощение конструкции привода разделяющих штампов и раздвигающихся матриц, между которыми зажата заготовка костылей. Оптимальное кинематическое соотношение рубки с растяжением реализовано кривошипным и коленно-рычажными механизмами.

Гидравлические схемы оказываются полезными при анализе даже сравнительно простых способов ОМД с комбинированным нагружением, таких как, волочение с противонапряжением (рис. 4), с которого и начиналась в свое время разработка идей комбинирования внешних нагрузок. Реализованная в экспериментах [7] гидравлическая схема позволила установить связь между реакцией опоры волокна R и относительного противонапряжения S_0 :

$$R = P_B \left(1 - \frac{\lambda}{k} S_0 \right),$$

где $S_0 = \frac{q_0}{\sigma_{s0}}$; $q_0 = \frac{Q}{F_0}$; Q – сила противонапряжения; F_0 – площадь сечения заготовки до волочения; σ_{s0} – сопротивление деформации металла на входе в волоку; λ – вытяжка; k – коэффициент упрочнения металла в проходе; P_B – сила волочения без противонапряжения.

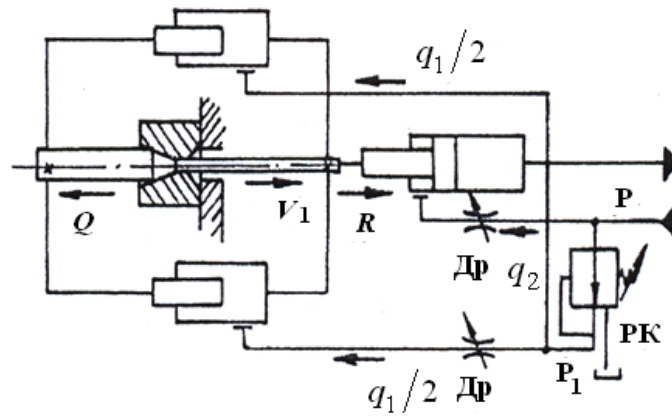


Рис. 4. Схема волочения с противонапряжением

Если противонапряжение создается редуцированным давлением P в цилиндрах с суммарной площадью плунжеров f_1 , а волочение – давлением P в цилиндре с площадью поршня f , то коэффициент редукции клапана РК при выровненных дросселями Др гидросопротивлениях в напорных линиях должен быть определен при заданном относительном противонапряжении S_0 по формуле

$$\rho = \frac{P_1}{P} = P_B \frac{\lambda S_0}{f c \eta k p},$$

где $k = f_1/f$;

$$\eta = \frac{P_B}{F_1 k \sigma_{s0}}; \quad F_1 - \text{площадь}$$

поперечного сечения тянутого профиля.

Коэффициент η имеет смысл коэффициента запаса прочности при волочении без противонапряжения.

Расход рабочей жидкости при волочении с противонапряжением

$$q = q_1 + q_2 = V_1 f \left[1 + c \left(1 - \frac{1}{\lambda} \right) \right],$$

а мощность волочения составляет

$$N = V_1 \left[P_B \left(1 + \frac{1-\lambda}{\eta} \right) - R \frac{1-\lambda}{\eta} - Q \eta \right].$$

Многие исследованные процессы ОМД с комбинированным нагружением оказываются эффективными в технологии производства поковок, в частности из непрерывнолитых заготовок. Более того, совокупность этих способов деформирования позволила говорить о возможности создания агрегата нового типа, названного обрабатывающим центром.

В большинстве операций свободнойковки на обрабатывающем центре используется комбинированное нагружение, в основном с двухпоточной схемой привода. Примером трехпоточной операции может служить растяжка с кручением дисков со ступицей, которая не известна до настоящего времени в кузнечной практике. Она осуществляется при помещении заготовки между торцами бойков ковочных блоков осевым перемещением одного из блоков и разведением бойков обоих ковочных блоков. Противонаправленность замыкания бойков у блоков обеспечивает при этом скручивание поковки. Каждая точка контактной поверхности в своем перемещении при разведении бойков имеет тангенциальную и радиальную составляющие. Последняя превращает силы контактного трения в активные, обеспечивающие интенсивное радиальное течение металла. Непрерывно расходящийся раствор бойков обоих ковочных блоков формирует ступицы диска, приобретающие форму шестигранных усеченных пирамид.

Двойное комбинирование внешних нагрузок при выполнении этой операции обеспечивает заметное снижение осевого усилия, уменьшение припусков на механическую обработку, увеличение степени деформации и, следовательно, повышение качества поковок дисков.

Принципиально новый подход к разработке технологий и машин с позиций комбинированного нагружения – это применение оптимальной архитектуры машины, отказ от сложившихся в области свободнойковки технологических и конструктивных стереотипов, затормозивших развитие способов изготовления особенно крупных поковок, порождение новых технологических объектов, свободных от известных недостатков современной технологии свободнойковки, пригодных как для реализации известных, но не применяемых из-за отсутствия соответствующего оборудования, способовковки, так и для порождения целого ряда совершенно новых технологических приемов, основанных на рациональном комбинировании внешних нагрузок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел /А. Надаи. – М.: ИИЛ, 1954. – Т.1. – 647 с.
2. Жуков А.М. Об условиях разрушения пластических металлов при сложном напряженном состоянии /А.М. Жуков //Известия вузов АН СССР. – 1958. – № 5. – С.56–62.
3. Жуков А.М. Сложное нагружение и теория пластичности изотропных металлов /А.М. Жуков //Известия вузов АН СССР. – 1955. – № 8. – С.81–92.
4. Жуков А.М. Пластические деформации стали при сложном нагружении /А.М. Жуков //Известия вузов АН СССР. – 1954. – №11. – С. 53–61.
5. Жуков А.М. О пластических деформациях изотропного металла при сложном нагружении /А.М.Жуков //Известия вузов АН СССР. – 1956. –№12. – С.72–87.
6. Качанов Л.М. Основы теории пластичности /Л.М. Качанов. – М.: Наука, 1969. – 420 с.
7. Леванов А.Н. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением /А.Н. Леванов [и др.] – М.: Metallurgia, 1976. – 416 с.