

№ 23 - 96

11 коп.

Индекс 70067

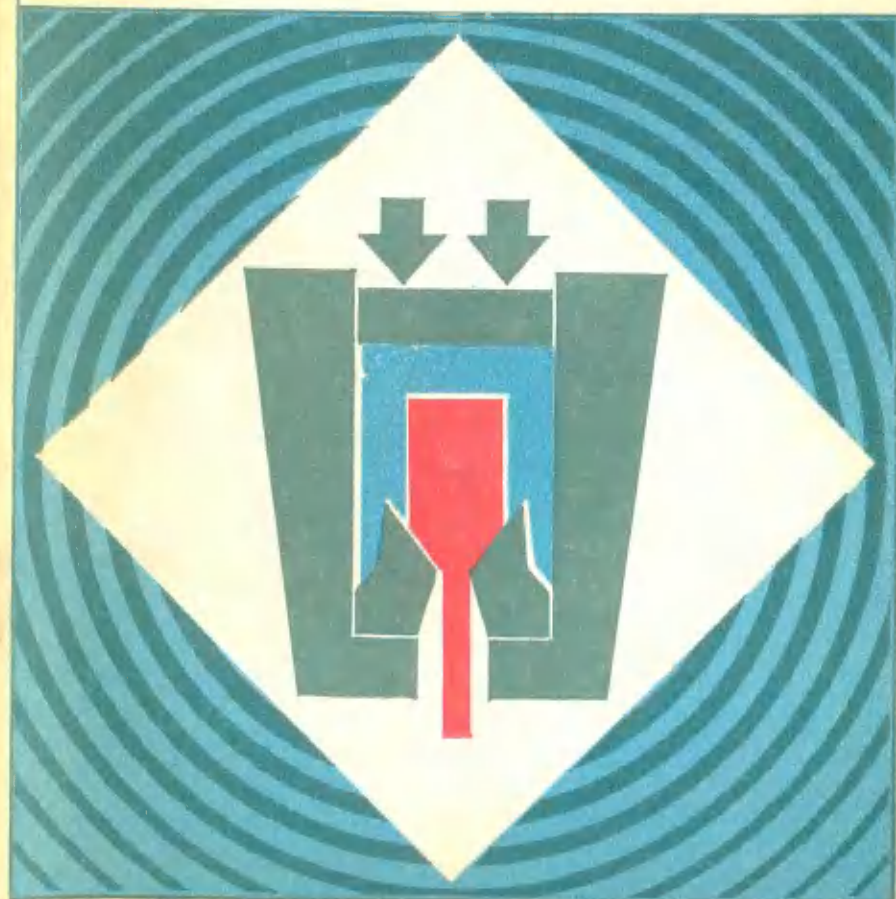
НОВОЕ  
В ЖИЗНИ, НАУКЕ,  
ТЕХНИКЕ

ЗНАНИЕ

8/1977

СЕРИЯ  
ТЕХНИКА

А.М. Белоцерковский  
ВЫСОКИЕ  
ДАВЛЕНИЯ  
В ТЕХНОЛОГИИ



Белоцерковский А. М.

Б43 Высокие давления в технологии. М., «Знание», 1977.

64 с. (Новое в жизни, науке, технике. Серия «Техника», 8. Издается ежемесячно с 1961 г.)

Автор рассказывает о больших возможностях сверхвысоких давлений, об их использовании в современных технологических процессах — тонком измельчении, формовании и прессовании, пропитке, упрочнении, пластическом формоизменении и т. д.

Материал рассчитан на читателя, интересующегося проблемами научно-технического прогресса.

30100

6П5.7

## Тонкое измельчение

Успехи физики высоких давлений сделали их инструментом принципиально новых технологических процессов воздействия на форму, структуру и свойства промышленных материалов.

Понятие «высокое давление» — в известной степени условное. В технике, например, принято считать высокими давления от 500 до 3000 МПа, т. е. давления, соизмеримые с прочностью наиболее распространенных в машиностроении конструктивных материалов — легированных сталей. Именно в этом диапазоне располагаются многочисленные технологические приложения, которым посвящена настоящая брошюра.

Динамическое давление от удара или взрыва действует доли секунды. Выделяемое тепло нарушает стабильность температурного режима. Само давление как сила, действующая на единицу площади, неодинаково во всем объеме сжимаемого тела, т. е. негидростатично. Технологическое воздействие происходит при неустановившемся термодинамическом равновесии. Поэтому детальное рассмотрение технологического использования динамического давления выходит за рамки настоящей брошюры.

Устройств для создания высокого давления разработано очень много, причем в разных областях техники. На рис. 1 приведено классификационное дерево технологических приложений высокого давления. В качестве наиболее общего критерия разбиения принят вид материала. Применяемые в технике материалы практически можно разбить на 5 классов: твердые, пластичные, эластичные, аморфные и пористые. За критерий второго уровня взят процесс воздействия на микроструктуру материала: тонкое измельчение, формование и прессование,

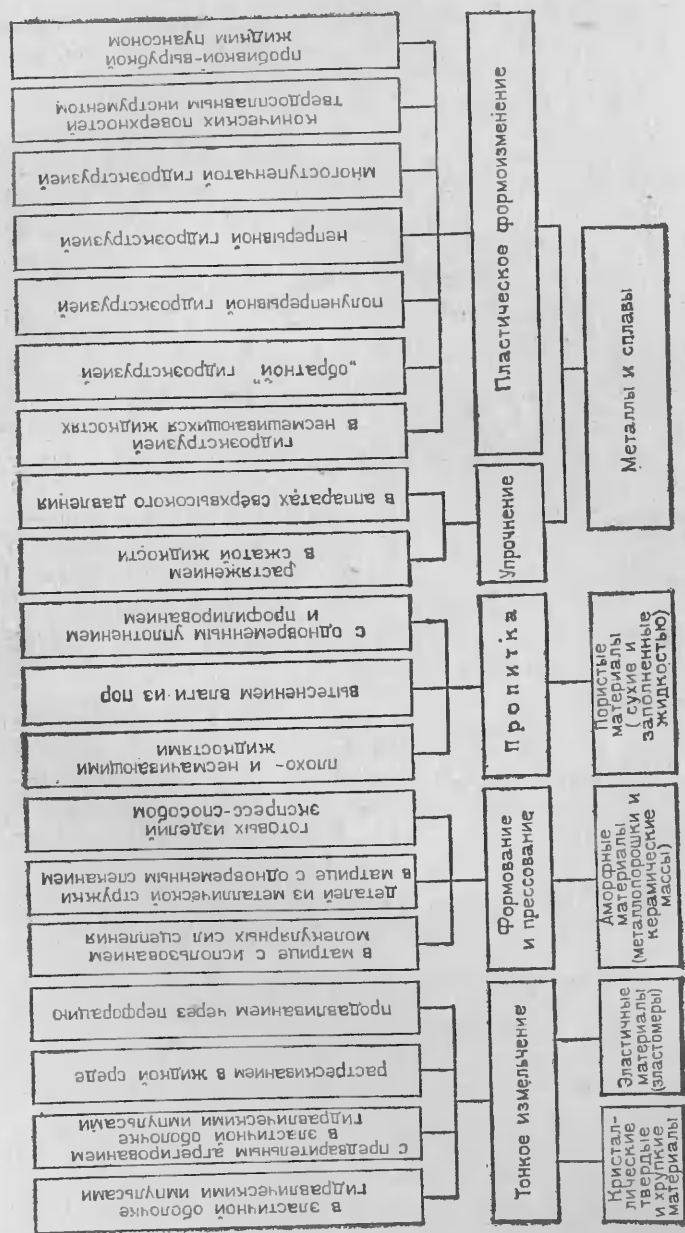


Рис. 1. Технологические приложения высокого давления

пластическое формоизменение, упрочнение, пропитка. Третий уровень — способы воздействия на конкретные материалы, которые позволяют реализовать цели, перечисленные на втором уровне.

К твердым и хрупким материалам относятся те, у которых прочность на сжатие существенно превышает прочность на растяжение. Предварительное измельчение твердых тел ускоряет процессы химического взаимодействия, обжига, растворения, т. е. те, которые протекают тем быстрее, чем больше поверхность участвующих в них твердых тел. Без тонкого измельчения затормозилось бы развитие радиоэлектроники, ядерной энергетики, ракетостроения, металлургии и химии. Новым отраслям техники потребовались керамические и металло-керамические материалы. Все технологии их получения требуют весьма тонкого измельчения исходных материалов.

Несмотря на столь острую необходимость, несмотря на тщательную инженерную разработку, существующие методы тонкого измельчения весьма несовершенны. Они не могут стать базой прогресса в этой области в силу принципиальных недостатков — длительность, энергоемкость, пылеобразование при помоле, шум, трудности герметизации. Необходимы новые идеи.

**Измельчение в эластичной оболочке гидравлическими импульсами высокого давления.** Практики применяют 4 способа измельчения: раздавливание, раскалывание, истирание и удар. Твердый кусковый материал наибольшее сопротивление оказывает раздавливанию, меньшее — раскалыванию, еще меньшее — истиранию (т. е. сдвигу) и наименьшее — растяжению. Растягивающие напряжения — следствие изгиба. Это подсказало идею создать условия знакопеременного изгиба твердого и хрупкого порошкообразного материала. Порошок, помещенный в эластичную оболочку, проходит через несколько циклов гидростатического давления. Его величина существенно выше предела прочности на растяжение частиц порошка. После каждого обжатия давление резко снижается.

Результаты экспериментов показали, что все абразивные материалы быстро и эффективно дробятся. Так, частицы монокорунда 12 после трехкратного воздействия давлением 740 МПа с выдержкой 1—2 с уменьшились примерно на порядок. То же (и с тем же результа-

том) проделали с карбидом бора. Хорошо измельчался и белый электрокорунд, хотя уже при давлении 740 МПа наблюдалось небольшое агрегирование.

Весьма эффективно измельчается кокс — за несколько циклов от 2—3 мм до 0,1—0,07 мм. Следует иметь в виду, что от тонкости измельчения кокса зависит качество электродов и других электроугольных изделий. Измельчение кокса — узкое место при изготовлении электроугольных изделий, высока и стоимость помола тонны. А ведь только в 1975 г. сварочных электродов, например, выпущено 629 тыс. т; ясно, какие выгоды даст внедрение гидроимпульсного измельчения, не говоря об улучшении качества. Кроме того, после измельчения мелкие частицы становятся острокрылатыми, что существенно для абразивных порошков.

Для каждого материала существует граница измельчения. При дальнейшем повышении давления начинается обратный измельчению процесс — спрессовывание, или агрегирование. Тверже частицы — выше максимально возможная дисперсность порошка и граница измельчения. Чем точнее классифицирован исходный материал, тем эффективнее измельчение. При превышении граничного давления образуются довольно плотные, но сравнительно малопрочные совокупности из частиц — агрегаты, промежутки между которыми заполнены более мелкими частицами.

Критерием применимости описанного способа тонкого измельчения к различным материалам может служить отношение предела прочности на сжатие к пределу прочности на растяжение. Чем выше это отношение, тем эффективнее измельчается материал.

Технологическая оснастка способа (пуансоны, матрицы, контейнеры) на давление до 2000 МПа широко применяется при прессовании металлов, ее изготовление освоено. В качестве рабочей жидкости проще всего использовать воду. Чтобы повысить герметичность плунжерных уплотнений контейнера высокого давления, над слоем воды наливают слой минерального масла. Расчетная энергоемкость гидроимпульсного измельчения — 0,03 кВт·ч/кг. Это ниже, чем в вибромельницах типа М 200 (при помоле песка — минимум 0,062 кВт·ч/кг).

Устройство непрерывного тонкого измельчения (рис. 2) состоит из контейнера 1, в рабочей полости 2 которого находится эластичная труба 3. Контейнер уста-

новлен на конусной полую опоре 4 подставки 5. Эластичная труба герметично присоединена к верхнему 6 и нижнему 7 штуцерам с помощью хомутов 8. Верхний штуцер закреплен полую гайкой 9. Длина каналов в верхнем и нижнем штуцерах не менее 4—5 их диаметров. Жидкость через отверстие 10 подается в контейнер от гидрокompрессора или гидромuльтипликатора высокого давления. В полую гайку вставлена коническая воронка-бункер 11. Под подставкой находится передвижная камера-дозатор 12, связанная штоком 13 с гидротолкателем. Дозатор вместе с запорным шибером 14 может перемещаться по направляющим 15, в которых имеется выпускной люк с установленным под ним сборником измельченного материала.

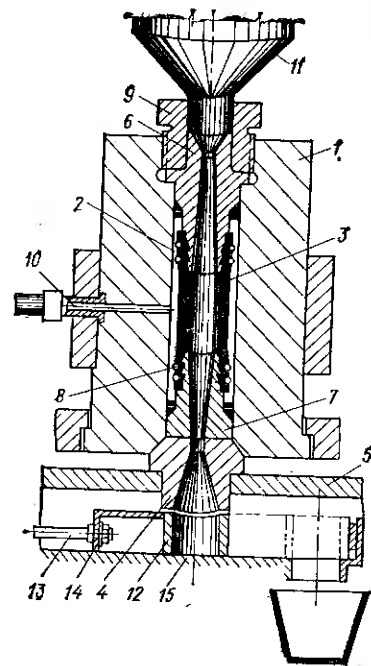


Рис. 2. Устройство для тонкого измельчения гидравлическими импульсами высокого давления

Предварительно раздробленный материал засыпают в бункер. Он заполняет (самотеком) эластичную трубу и все внутренние полости. Рабочую полость соединяют с гидрокompрессором или мультипликатором, периодически создающим высокое гидростатическое давление, величина которого превышает предел прочности на растяжение частиц измельчаемого материала. Выдавливанию материала вверх и вниз при обжатии противодействует столб сыпучей среды.

Давление снимают, и шток отодвигает камеру-дозатор в сторону. Ее содержимое через люк высыпается в емкость-сборник. Во время перемещения дозатора выходное отверстие перекрыто шибером.

Когда толкатель возвратит камеру в исходное положение, она снова заполнится измельченным материалом.

Так как объем камеры равен объему внутренней полости эластичной трубы, то после каждого цикла перемещения дозатора во внутреннюю полость шланга поступает новый объем измельчаемого материала и все повторяется.

Можно избавиться и от генератора гидравлических импульсов давления и соединяющих коммуникаций: встроить внутрь эластичной трубы полые электроды, к ним подвести высокое напряжение. Измельчение в этом случае происходит в кольцевой полости между стенками контейнера и резиновой трубкой.

После полной загрузки рабочей полости — от выходной воронки до выпускного лотка — в резиновую трубку через отверстия в электродах подается вода. Включается с заданной частотой трансформатор-выпрямитель, напряжение 50—60 кВ подается на конденсатор. При критическом его значении на конденсаторе происходит пробой формирующего промежутка. Как результат высоковольтного разряда между электродами в воде возникает ударная волна. Под ее действием формируется гидравлический импульс давления. Частота импульсов соответствует частоте следования разрядов.

Чтобы перемещать измельчаемый материал в эластичной трубе, нужно разбить сквозную цилиндрическую расточку на герметичные кольцевые полости, эти полости соединить с соответствующими гидравлическими мультипликаторами. При вращении поворотного гидрораспределителя мультипликаторы поочередно подключаются к питающему насосу. В результате в кольцевых полостях возникают импульсы высокого давления. Находящийся внутри эластичной трубы измельчаемый материал продавливается из одной кольцевой полости в другую, в направлении выходного отверстия.

На участках наибольшего износа эластичной трубы заформовывается проволоочная спираль, в цепь которой включено реле. Глубина расположения спирали определяется допустимым износом эластичной трубы; шаг выбирается таким, чтобы исключить продавливание единичных кусков измельчаемого материала. Когда из-за износа эластичной трубы спираль оголится и проволока будет разрушена, электрическая цепь сигнального реле разомкнется. Это сигнал о том, что дальнейшая эксплуатация недопустима.

Устройство для тонкого измельчения усовершенствовали сотрудники Всесоюзного научно-исследовательского и конструкторско-технологического института природных алмазов и инструмента В. С. Вобликов и Ю. П. Корнилов. Они снабдили эластичную трубу внутри контейнера высокого давления металлической защитной перфорированной оболочкой, загрузочный патрубок оборудовали подающим шнеком, а разгрузочный патрубок — тарельчатым клапаном. Устройство использовали для избирательного измельчения зерен природных алмазов.

Агрегирование — процесс, противоположный измельчению. Это спрессовывание кускового или порошкообразного материала под действием молекулярных сил сцепления, возникающих между деформированными частицами под высоким давлением. При предварительном агрегировании можно реализовать процесс **сверхтонкого измельчения**. Исходный кристаллический материал, например корунд, зернистостью 2 мм и менее помещают либо в эластичный чехол, либо в резиновую трубу контейнера высокого давления, где на него периодически подают давление. Величина давления должна быть существенно выше, чем при обычном измельчении гидрои импульсным способом, для корунда, скажем, 1200 МПа. Необходимо, чтобы возник эффект агрегирования, тот эффект, которого при существующих способах измельчения всячески стараются избежать.

Полученные агрегаты извлекают из контейнера, помещают в помольное устройство вибромельницы, добавляют воду (50—100% от массы агрегатов) и мелют. Время дезагрегирования в вибромельнице не должно превышать 10 мин: при большем времени дисперсность возрастает незначительно, зато сильно возрастает намот — загрязнение измельчаемого материала продуктами износа мелющих тел.

Каков же положительный эффект способа? Во-первых, продолжительность процесса уменьшается с нескольких часов до нескольких минут. Во-вторых, загрязнение диспергируемого материала также меньше. В-третьих, из-за сокращения производственного цикла измельчения и роста производительности высвобождаются производственные площади.

Новый способ тонкого диспергирования (до 1 мкм и менее) целесообразно внедрить в производстве техни-

ческой керамики, машиностроении, радиоэлектронике, ядерной энергетике. Техничко-экономический эффект от его применения можно ориентировочно оценить следующим образом. Тонна кристаллического порошка корунда при дисперсности менее 7 мкм стоит более 2000 руб. Снизить ее цену удастся по меньшей мере на 50%, грубо говоря на 1 руб. за 1 кг.

**Селективное измельчение анизотропных материалов.** Разновидность процесса гидроимпульсного измельчения — мокрое дробление кускового материала в периодически сдавливаемой жидкости.

Если поместить в контейнер, заполненный жидкостью, твердые анизотропные материалы: железную руду, кварцевый песок, полевой шпат, жидкость сжать, а затем резко сбросить давление, эти материалы разрушаются. Разрушение начинается в местах, ослабленных макро- и микротрещинами. Здесь нужно говорить о селективном измельчении — отделении слагающих анизотропное тело частиц друг от друга по их границам, процессе, положенном в основу обогащения полезных ископаемых. Известно, что примеси в минералах могут присутствовать в виде структурных замещений, твердых растворов, газовой-жидких и твердых включений других минералов. Наиболее трудноудаляемые примеси внутри зерен в кристаллических минералах — газовой-жидкие включения, т. е. растворы и газы, «захваченные» кристаллами либо во время их первоначального роста, либо образованные при более позднем распаде твердого раствора и заполнении трещинок. Особенно снижают качество огнеупорного сырья минеральные примеси пониженной огнеупорности (полевые шпаты, слюды, гидроокислы железа), примеси, разлагающиеся при высоких температурах с выделением газа (карбонаты, сульфиды и др.).

Существующие механические способы обогащения позволяют освободиться от пленочных образований лишь на внешней поверхности зерен. Но поверхностные пленки настолько прочны, что не полностью удаляются даже с внешней поверхности зерен. Химическая же обработка — горячими и холодными растворами — дорога и токсична. Кроме того, поверхность покрыта сетью микротрещин, в которых, как правило, также остаются примеси.

Поскольку при давлении, превышающем 100 МПа, жидкость проникает в мельчайшие субмикронные трещины, сжимаясь к тому же на 3—8%, при резком сбросе давления объем жидкости увеличивается. Она начинает действовать как клин, и материал разрушается преимущественно по поверхностям между зернами, где сконцентрированы микротрещины. Гидроимпульсное селективное измельчение открывает новые перспективы в процессах обогащения минерального сырья.

Близкий к описанному способ измельчения был предложен Снайдером (США) и реализован фирмой Лоун Стар. Предварительно раздробленный материал загружают в камеру. Там к жидкости или пару прикладывается определенное давление, которое с помощью специального разгрузочного клапана импульсно воздействует на материал. Смесь жидкости или пара с частицами измельчаемого материала выпускается в разгрузочную емкость. При резком сбросе давления куски разрушаются по межкристаллическим плоскостям. На канадских асбестовых рудниках этим способом получили из остатков (хвостов) примерно такое же количество асбестового волокна, какое обычно получают из добываемой руды.

Реализацией селективного измельчения на рудообогатительных фабриках отечественной металлургической промышленности успешно занимается институт Уралмеханобр (Свердловск).

Процесс измельчения начинается не с какой-то определенной величины давления. Вначале, когда давление составляет 30—50% от номинального, разрушаются сильно «трещиноватые» с поверхности зерна. Когда давление повышается до 60—70% от номинального, оно «добирается» до зерен с газовой-жидкими и твердыми включениями. Есть основания рекомендовать гидроимпульсное измельчение и для очистки минерального сырья от внутренних примесей, и для отделения бездефектных минеральных зерен.

Более того, так как способ позволяет раскрыть большее число зародышевых дефектов (микротрещин) на единицу объема разрушаемого тела по сравнению с существующими, то, следовательно, повышается химическая активность диспергированного продукта: из-за деструкции кристаллической решетки и увеличения аморфной фазы. Степень аморфизации не пропорциональна



дисперсности и зависит от способа измельчения, при гидроимпульсном измельчении она выше. Практически так можно повышать активность химических катализаторов.

И наконец, присадка в жидкость поверхностно-активных веществ повышает эффективность селективного измельчения. Это ценно в химии, например, при изготовлении лаков и красок (диспергирование пигментов в среде пленкообразователя).

**Об автоматизации гидроимпульсного измельчения.** При управлении отдельными механизмами технологической цепи автономными средствами — кнопочным пускателем загрузочного устройства, гидрораспределителями источника жидкости высокого давления и приводом камеры-дозатора — оператор непрерывно манипулирует тремя органами управления. Он быстро утомляется, наступают перебои в работе, снижается производительность агрегата. Разработана система автоматического управления (САУ) тонким измельчением.

Энергоноситель в процессе измельчения — жидкость, привод загрузочного и разгрузочного устройств — гидравлический. Естественно, что энергия в САУ гидравлическая, что делает ненужными устройства преобразования одного вида энергии в другой; это увеличивает надежность САУ.

Но САУ, хотя и повышает производительность по сравнению с ручным управлением, — это еще далеко не автоматическое регулирование процесса измельчения, т. е. автоматическое управление по отклонениям технологических параметров.

Степень дисперсности материала, измельчаемого гидроимпульсным методом, определяется (при неизменной крупности исходного продукта и равномерной загрузке) амплитудой и частотой гидравлических импульсов высокого давления, воздействующих на эластичную оболочку трубопровода, в который помещен измельчаемый материал. Эластичный трубопровод периодически сжимается, следовательно, периодически изменяется объем жидкости в рабочей полости контейнера. Таким образом, величину этого объема можно использовать как параметр автоматического регулирования. На рис. 3 приведена структурная схема системы автоматического регулирования (САР).

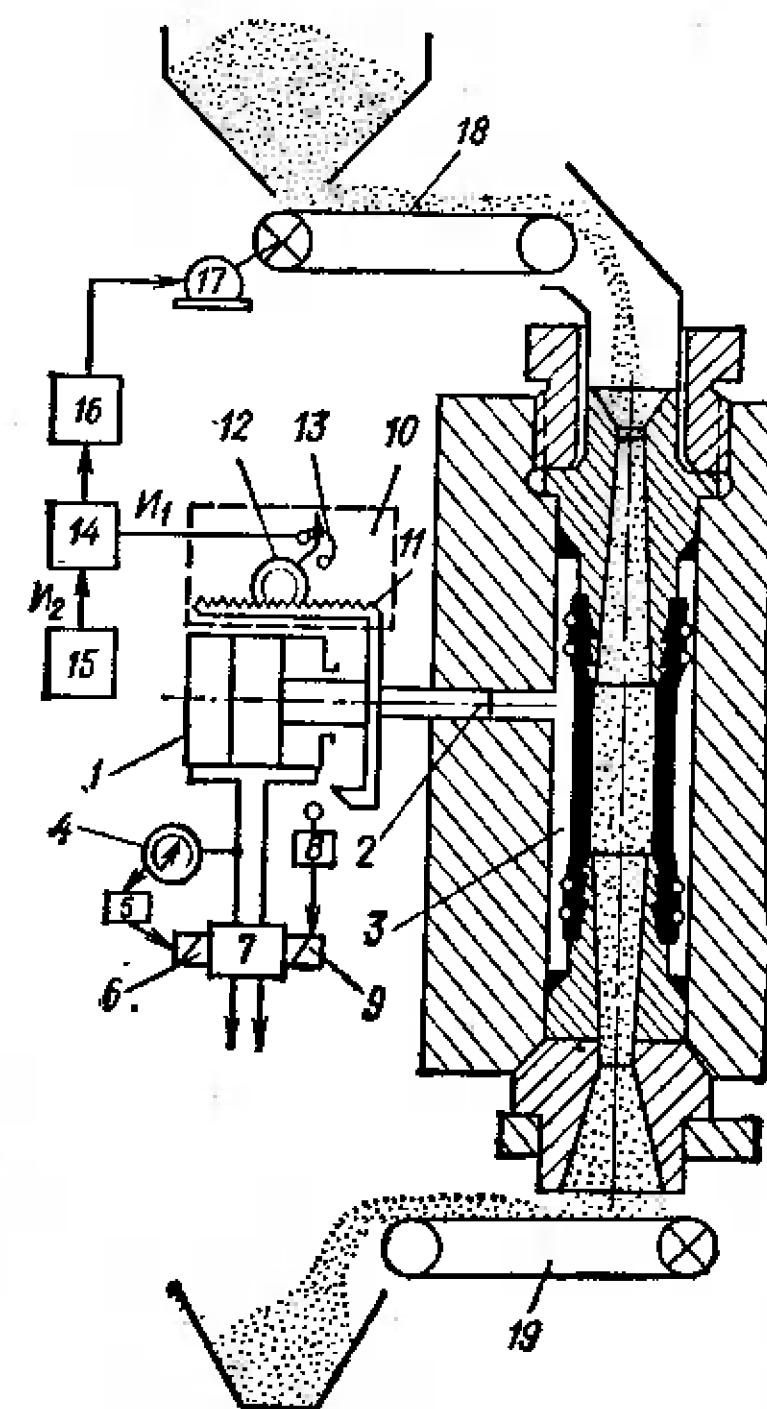


Рис. 3. Система автоматического регулирования гидроимпульсного тонкого измельчения

При подаче давления в поршневую полость гидроцилиндра 1 плунжер 2 мультипликатора начинает сжимать жидкость в рабочей полости 3 контейнера высокого давления. Когда величина давления достигает заданного значения, срабатывает реле давления 4 и включает реле времени 5, по сигналу которого через заданный промежуток времени электромагнит 6 осуществит реверс золотника 7; плунжер возвратится в исходное положение.

В конце обратного хода плунжера срабатывает конечный выключатель 8, соответствующий импульс подается на электромагнит 9 реверсивного золотника, и снова начинается рабочий ход — сжатие жидкости в рабочей полости контейнера.

На плунжере мультипликатора установлен датчик линейного перемещения 10 в виде зубчатой рейки 11, сцепленной с зубчатым колесом 12, на оси которого зафиксирован движок потенциометра 13. Напряжение  $U_1$  подается на один из двух входов блока сравнения 14. На второй его вход подается напряжение  $U_2$  от задающего устройства 15, соответствующее требуемому режиму измельчения. Сигнал, соответствующий разности напряжений, поступает на магнитный усилитель 16, к выходу которого подключена обмотка возбуждения электродвигателя 17 привода питателя исходного продукта 18. Скорость вращения плавно регулируется, в результате чего плавно изменяется подача исходного продукта.

Наличие обратной связи по фактическому значению регулируемого параметра позволяет при данной системе автоматического регулирования реализовать принцип непрерывного измельчения. Для этого (кроме прочего) имеется питатель измельченного материала 19 непрерывного действия.

**Измельчение эластичных материалов и отделение их от металлической армировки.** Если измельчению твердых материалов «препятствует» их твердость, то измельчению эластичных материалов мешает диаметрально противоположное свойство — пластичность. Известно, что модуль сдвига полимерных эластомеров типа резины равен 0,35 модуля упругости, а модуль объемного сжатия в 8 раз превышает модуль упругости, т. е. примерно в 23 раза больше, чем модуль сдвига. Поэтому эластомеры подобны жидкости: они трудносжимаемы и не меняют объема при деформации.

Если, например, резину подвергнуть высокому гидростатическому давлению, она, как жидкость, вытекает через сколь угодно малое отверстие. Это свойство эластомеров можно использовать, во-первых, чтобы получать нитеобразные продукты, во-вторых, для отделения полимерных материалов от армировки. Поскольку металл становится текучим при существенно более высоком гидростатическом давлении, объем металлической армировки остается постоянным. Последнее обстоятельство позволяет решить проблемы переработки изношенных металлоармированных полимерных материалов (шин с металлокордом и проволоочной армировкой бортов, металлотросовых конвейерных лент, рукавов высо-

кого давления и т. п.). До сих пор все это «хозяйство» попросту сжигали. По сообщениям печати количество утильных шин с металлокордом (которые вынуждены сжигать) в 1974 г. достигло 15 млн. шт., а в недалеком будущем эта цифра возрастет до 45 млн. шт.

Отделить полимеры от металлической армировки можно с помощью весьма несложного устройства (рис. 4), состоящего из контейнера высокого давления 1, в рабочей полости которого имеется уплотненный плунжер 2 и матрица 3 со сквозными отверстиями 4, выпускных отверстий 5 и выталкивателя 6. Это устройство можно установить на любом промышленном гидропрессе, имеющем выталкиватель: уплотненный плунжер 2 следует соединить с подвижной траверсой гидропресса.

Полимерный материал 7 с металлической армировкой закладывают в рабочую полость контейнера. Туда же вводится уплотненный плунжер. Когда давление достигает 10—100 МПа, полимерный материал выдавливается через отверстия, а металлическая армировка остается в рабочей полости.

Когда весь полимер выдавлен, плунжер возвращают в исходное положение, а выталкиватель подают вверх. При этом матрица с металлической армировкой также поднимается. Матрица доходит до верхнего торца контейнера, армировку удаляют, выталкиватель и матрицу опускают в исходное положение, а в рабочую полость контейнера закладывают новую порцию материала. Цикл повторяется.

По сравнению с методом предварительной выдержки металлоармированного полимерного материала в органических растворителях с последующим воздействием высоконапорной струи при одновременном вращении описанный способ обладает очевидными преимуществами.

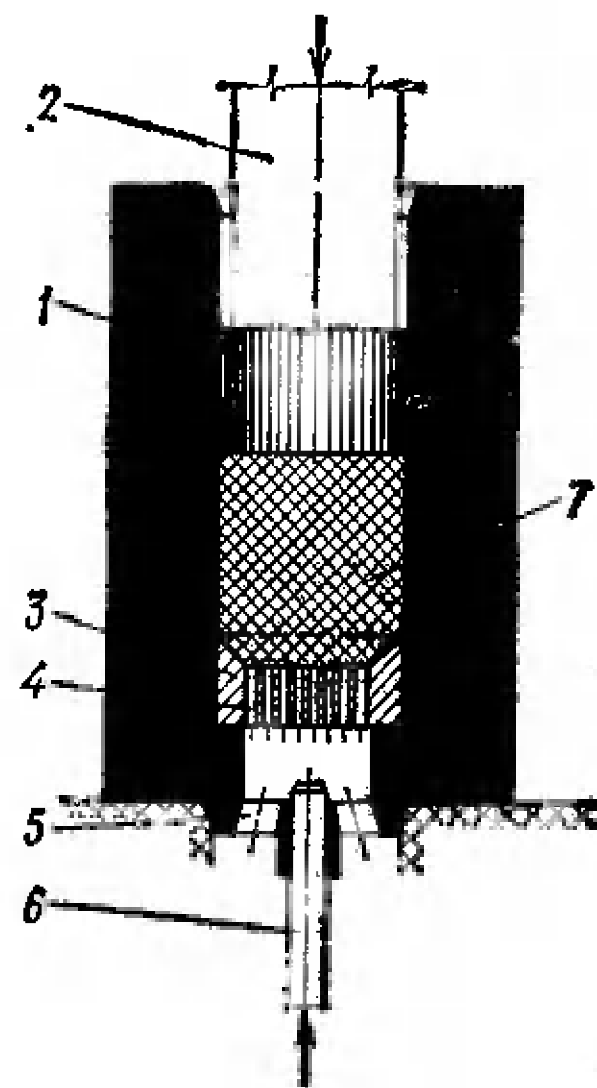


Рис. 4. Устройство для отделения полимерных материалов от металлической армировки



ществами. Во-первых, снижается общая продолжительность процесса, так как не тратится время на выдержку полимерного материала в органических растворителях, дополнительное дробление на мельничных вальцах до крупности частиц 1—2 мм и удаление металла. Во-вторых, металлическая армировка не может попасть в отделяемый полимер. В-третьих, улучшаются санитарно-гигиенические условия труда из-за отсутствия пыли, грязи и шума. В-четвертых, уменьшается расход воды на тонну перерабатываемого материала, да и стоки ее менее загрязнены. Наконец, низкая энергоемкость процесса отделения резины от металлокорда (по экспериментальным данным удельная энергоемкость 0,21 кВт·ч/кг).

## Формование и прессование

**Молекулярные силы в процессе спрессовывания.** Силы взаимодействия между атомами, так же как и силы, действующие в самом атоме, имеют квантовую природу. Не вникая в механизм их взаимодействия, остановимся здесь вот на чем.

Известно, что для частиц кристаллического твердого тела существует энергетический порог сращивания. Чтобы его преодолеть, необходимо приложить определенную энергию активации — либо нагрев тело до температуры плавления, либо уплотнив его под высоким гидростатическим давлением, либо обоими способами одновременно. В последнем случае сращивание однородных материалов происходит практически мгновенно ( $10^{-3}$ — $10^{-6}$  с).

Таким образом, чтобы получить монолит из отдельных частиц, необходимо создать связи между поверхностными атомами отдельных частиц материала, преодолев энергетический барьер — силы отталкивания, возникающие вследствие взаимодействия электростатических полей поверхностных атомов.

**Формование керамических материалов без связки.** Существующая технология разбита на следующие операции: тонкий помол исходных материалов в шаровых, струйных или вибромельницах; смешивание полученного порошка со связующим или пластификатором; предварительное формование заготовки, например, в пресс-

форме; гидростатическое обжатие заготовок давлением 200—500 МПа в течение нескольких минут; удаление связующего или пластификатора нагреванием или выжиганием.

Пластификатор вызывает образование пор, повышение объемной усадки, появление трещин, раковин, рыхлот и существенно удлиняет цикл изготовления изделий; длительный помол в мельницах загрязняет порошок продуктами износа футеровки и мелющих тел.

Лучший способ устранения недостатков существующей технологии, повышения плотности формуемых изделий и их качества — формование без связующих и пластификаторов, т. е. за счет сил молекулярного сцепления (разумеется, при давлениях, технически достижимых). Но добиться молекулярного сцепления при существующей технологии невозможно: удельной работы уплотнения 120—180 кгм/см<sup>3</sup>, т. е. давления 1200—1800 МПа, для этого недостаточно. Более повышать давление нельзя — жидкость «замерзает», а контейнеры не выдерживают. Потому-то и вводят в дисперсный материал связующее, оно снижает необходимую для сцепления частиц энергию активации материала.

Советский ученый Г. С. Ходаков обнаружил, что молекулярное сцепление тонких порошков определяется в основном не величиной их удельной поверхности (т. е. размерами частичек), а уменьшением энергии активации в результате аморфизации и разрушения структуры частичек исходного материала. Эксперименты показали, что с помощью гидроимпульсного измельчения можно максимально разрушить структуру диспергируемого материала, а следовательно, и максимально уменьшить энергию активации. Значит, можно измельчать материал перед спрессовыванием циклическим воздействием гидростатического давления. В результате уменьшатся энергия активации, а следовательно, и требуемое давление.

После гидроимпульсного измельчения в контейнере высокого давления и отсева измельченного продукта первоначальное оформление заготовок (без связующих и пластификаторов) проводят в обычной пресс-форме. Затем образцы помещают в резиновую трубку, герметизируют и опускают в контейнер высокого давления, заполненный водой. Плунжером повышают давление и поддерживают его 2—10 с. Далее заготовки извлекают и испытывают на прочность. Все керамические массы

весьма эффективно спрессовываются при давлении от 1200 до 1800 МПа без связки.

Возможный диапазон применения прессования без связующих чрезвычайно широк. Это и изделия технической керамики, особенно диэлектрики для радиоэлектронных устройств, и металлокерамические изделия из твердых сплавов в порошковой металлургии. И многое другое. Техничко-экономическую эффективность способа можно условно оценить следующим образом. Средняя преysкурантная стоимость 1 т электроизоляционных и радиотехнических керамических изделий примерно 5000 руб. При ежегодном выпуске, допустим, высокоплотной технической керамики такого типа порядка 100 тыс. т годовая экономия составит 25 млн. руб. (считая, что стоимость заготовок 50% от стоимости изделий, а экономия от упрощения технологии формования и сокращения производственного цикла не менее 10%).

На одном из заводов твердых сплавов в технологический процесс ввели дополнительную операцию — после предварительного обжата в пресс-формах детали одевают в эластичную оболочку, «давят» с усилием до 2000 МПа, а затем спекают обычным способом. Результат — резко сократился процент брака.

**Спрессовывание металлической стружки.** В настоящее время основной способ переработки вторичных черных и цветных металлов независимо от конфигурации лома — переплавка. Однако он далеко не оптимален. Как известно, 40% всего лома и отходов цветных металлов и сплавов составляет стружка. При гидростатическом прессовании металлических частиц произвольной формы и размера можно получить достаточно плотную и прочную заготовку любой конфигурации. Но все-таки это — еще не компактный металл. Каков же энергетический порог срачивания в данном случае? Исследования показали, что для срачивания стружки цветных металлов необходима температура, равная 0,6 температуры плавления, и давление 50—250 МПа.

Реализовать эти условия полного молекулярного срачивания, другими словами, бесплавильный переработки стружки цветных металлов, можно с помощью нескольких технологических схем.

**Схема 1.** Совместное скоростное (скорость повышения температуры 40—50 град/с) циклическое нагревание и пластическая деформация сжатием предварительно

гидростатически спрессованной заготовки, покрытой газонепроницаемой обмазкой (см. следующий раздел главы).

**Схема 2.** Прессование и спекание стружки электроимпульсным нагревом. Последовательность операций: пресс-форму покрывают пастообразной электротеплоизолирующей обмазкой; обмазку сушат; пресс-форму устанавливают на нижний пуансон, подводят ток и засыпают стружку; в пресс-форму вводят верхний пуансон и подпрессовывают стружку для удаления воздуха из пор; включают генератор электрических импульсов и разогревают стружку до температуры 0,6 от температуры плавления (плотность тока в импульсах 15—50 А/мм<sup>2</sup>, скорость повышения температуры 40—600 град/с); подают давление порядка 20—600 МПа (в зависимости от вида спекаемого материала); давление снижают и пресс-форму распрессовывают.

Да, для бесплавильной переработки стружки цветных металлов и сплавов в готовые изделия типа непрерывных профилей (прутков, труб, угольников, товаров и т. п.) прессование весьма перспективно. В ходе экструзии за один цикл осуществляют два процесса — уплотнение и пластическую деформацию стружки. Ни один другой технологический процесс не создает условий, столь благоприятных для полного срачивания. Удельные давления в 2000—2500 МПа позволяют деформировать стружку при температурах существенно ниже температуры спекания. Значительная деформация увеличивает контактные поверхности частиц и разрушает пленки окислов, т. е. в конечном счете усиливается диффузия и образуются однородные структуры из различных исходных компонентов.

УкрНИИ Спецсталь (Запорожье) совместно с Физико-техническим институтом АН УССР (Донецк) разработали способ получения прутков-заготовок горячей гидроэкструзией исходного порошка быстрорежущей стали в оболочке. Порошок в металлической оболочке, нагретый до 1423 К, продавливают через матрицу. Рабочая жидкость — расплавленное стекло или псевдожидкость (порошок графита). Производительность — 400—500 деталей в смену. Стойкость инструмента, полученного таким способом, в несколько раз выше, чем при изготовлении из обычного проката быстрорежущей стали.

Бесплавильная переработка стружки, сочетающая

скоростной электроимпульсный нагрев и экструзию, исключает потери металла от угара при плавлении — это 5—6% его, резко уменьшает потери на стружку при механической обработке и существенно сокращает длительность процесса изготовления изделий.

Скоростной нагрев удобно выполнять с помощью обычных импульсных источников тока. Уплотнять же стружку можно различными способами. Расчеты показывают, что если принять стоимость 1 кДж работы на гидропрессе с усилием 160 т за единицу, то уплотнение с помощью импульсного водомета будет в 2,25 раза, газодинамического молота — в 5 раз, электрогидравлического пресса — в 16,2 раза и взрывчатки — в 41,7 раза дороже. Относительно импульсных (взрывных и газодинамических) источников давления следует отметить, что при деформации со скоростью примерно 18 м/с начинается интенсивное местное течение поверхностных слоев металла. Вследствие кратковременности воздействия тепло, выделившееся в местах сдвига при деформации металла, не успевает отводиться, резко проявляется местный тепловой эффект и сопротивление металла деформации в этих зонах падает. Глубинные же зоны брикета не сплавляются.

**Совмещение высокого давления, высокой температуры и высокой скорости деформирования.** Чтобы достичь теоретически максимального уплотнения (т. е. перевести в монолитное состояние порошкообразный материал, занимающий определенный объем), необходимо затратить некоторую работу. Она количественно эквивалентна энергии, необходимой для нагрева до температуры плавления  $T_{пл}$  и полного расплавления единицы объема твердого тела:  $W_{\max} = A[Q_{пл} + Q_{фаз} + c\gamma(T_{пл} - T_{нач})]$ , где  $A$  — механический эквивалент тепла;  $Q_{пл}$  — теплота плавления;  $Q_{фаз}$  — теплота фазового перехода;  $C$  — теплоемкость;  $\gamma$  — плотность материала.

При совместном действии температуры и давления можно записать:  $W_{\max} = W_t + W_p$ , где  $W_t$  — энергия, соответствующая нагреву до температуры  $T_{нач}$ ;  $W_p$  — работа уплотнения при давлении  $p$ .

Поскольку для любого твердого тела  $W_{\max} = \text{const}$ , то, повышая  $W_p$ , соответственно уменьшаем  $W_t$ .

Таким образом, сочетание высокого давления с другими физическими параметрами, например высокой температурой и высокой скоростью деформации, открывает

новые перспективы перед металлообработкой, позволяет создавать необычайно эффективные технологии, объединяющие металлургические и металлообрабатывающие процессы. Приведем лишь один пример.

Известно, что производство и применение титана резко возрастает. Титан — это не только «крылатый» металл, это металл стойкий к различным агрессивным средам. Каждая тонна титана в химической промышленности приносит 15—20 тыс. руб. годовой экономии. Но титан чрезвычайно активный металл, поэтому получать и охлаждать слиток, термически его обрабатывать, подвергать горячей прокатке, сваривать приходится в глубоком вакууме или под защитой инертных газов. Конструкции печей для плавки титана очень сложны, технология его переработки трудоемка. Не удивительно, что титан стоит дороже алюминия, магния, меди, не говоря уже о черных металлах, хотя в земной коре его содержится намного больше, чем меди, свинца, цинка и драгоценных металлов, вместе взятых.

Есть еще одна ложка дегтя: отходы титана — стружка, обрезь, губка — составляют примерно 70—80% всего перерабатываемого металла и не могут быть использованы на машиностроительных предприятиях. Их хранят на заводах для отправки на специализированные металлургические комбинаты.

За последние годы отходы титана и сплавы на его основе научились перерабатывать в порошки электролизом с растворенным анодом. Казалось бы, проблема решена — методами порошковой металлургии сейчас можно изготовить любую деталь. Но прессовки из порошкообразных отходов титана спекаются только в глубоком вакууме в течение 6—16 ч, и к тому же они довольно пористы.

Была опробована следующая технология. Предварительно отпрессованную под высоким гидростатическим давлением порошковую заготовку 1 (рис. 5), покрытую защитной оболочкой 2, устанавливают в контейнер-вулкну 3. Затем с торцов заготовки подводят осаживающие бойки 4, соединенные со вторичной обмоткой сварочного трансформатора 5.

Поскольку целостность и герметичность покрытия (десорбция газов через поры материала) зависят от скорости повышения температуры и равномерности распределения покрытия по толщине, в первом цикле ско-

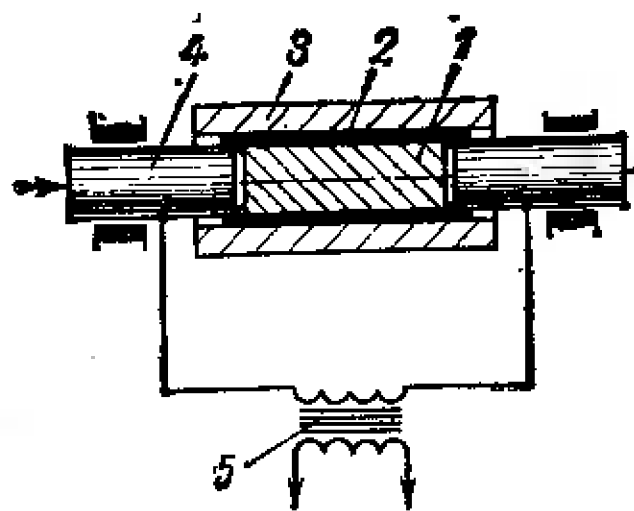


Рис. 5. Устройство для совмещения высокого давления, высокой температуры и высокой скорости деформирования

рость повышения температуры не должна превышать 15 град/с, а максимальная температура — 873—973 К.

Во время первого цикла бойки-токоподводы остаются неподвижными—заготовка расширяется. По достижении граничной температуры выдержка 6—15 с (в зависимости от диаметра заготовки). Затем ток повышается до величины, соответствующей плотности 9—11 А/мм<sup>2</sup>. Когда заготовка

нагревается до 1400—1500 К, осаживающие бойки под действием осевого усилия сжимают нагретую заготовку с давлением 150—250 МПа; происходит пластическая деформация — двустороннее осаживание заготовки.

При температуре 1000 К предел текучести титана и его сплавов снижается до 20—50 МПа. Поэтому при давлении осаживания порядка 150—250 МПа, сжатие заготовки практически можно считать всесторонним и равномерным.

Затем трансформатор отключается, но бойки некоторое время, пока заготовка не остынет до 1000—1100 К, еще перемещаются во встречном направлении. Далее бойки останавливают, начинается новый цикл.

Для практики достаточно 8—10 циклов нагрева-деформации. При продолжительности цикла 20—30 с и охлаждения 10 с общее время получения «компактного» металла из порошков титана 4—5 мин. Так как заготовка после гидропрессования достаточно плотная, то изменение формы изделия вследствие пластической деформации при спекании весьма небольшое.

Механические свойства прутков, полученных описанным способом из порошкообразных отходов титана и его сплавов: предел прочности при разрыве — 400 МПа, относительное удлинение — 4—6%, пористость — менее 0,9%, твердость — 180НВ.

Описанным способом можно изготавливать любые металлокерамические изделия, особенно с включением активных металлов и сплавов. Микроструктура полученных образцов, в частности из бронзы ОЦСЗ-12-5, в зоне сращивания подтвердила, что произошло полное сращи-

вание частиц и металл получился плотный. Механические свойства: разрывная прочность  $\sigma_B = 180—210$  МПа, относительное удлинение  $\delta = 5—7\%$ , твердость  $H_B = 57—69$  кг/мм<sup>2</sup>. Можно получить плотное изделие и из неоднородного материала, например смеси бронзовой и латунной стружек. Микрофотографии таких образцов показали, что в месте контакта частиц двухфазного материала (латуни и бронзы) также имеет место полное сращивание.

Безвакуумный экспресс-способ и устройства для изготовления металлокерамических изделий уменьшают время изготовления на два порядка (с 6—16 ч до 4—6 мин). Кроме того, не нужны высоковакуумные печи для спекания заготовок. По ориентировочным подсчетам годовой экономический эффект от использования только порошкообразных отходов титана может составить несколько миллионов рублей.

В Брянском филиале Всесоюзного проектно-технологического института строительного и дорожного машиностроения разработана технология получения из порошков износостойких металлокерамических материалов и покрытий с помощью стандартной сварочной машины МРП-400. Принцип тот же: ток и высокое контактное давление. Режим работы машины задается специальным прерывателем ПИШ-200 и регуляторами времени РВЭ-7А или РВЭ-8.

## Пропитка

**Пропитка пористых материалов под высоким гидростатическим давлением.** Пропитка пористых материалов и изделий жидкостью — составная часть многих технологий — изготовления древесных пластиков, антифрикционной металлокерамики и электроугольных изделий, радиоконденсаторов, электро- и радиокерамики, консервирование и гидролиз древесины — эти отдельные примеры далеко не исчерпывают всего их разнообразия.

Пропитка — один из древнейших технологических процессов, за последние столетия появились только пропитка с попеременным вакуумированием и автоклавная пропитка с подогревом пропитывающей жидкости. Продолжительность же процесса существенно не уменьшилась, и сейчас пропитка — узкое место в технологиче-



ской цепи. Но если жидкость плохосмачивающая или несмачивающая — все попытки пропитать ее обычными способами пористый материал тщетны: капиллярные силы упрямо выталкивают ее. Плохо обстоит дело, когда необходимо пропитать материал, в порах которого имеется жидкость. Сейчас вся технология пропитки подобных материалов связана с предварительной просушкой.

Заглянув в учебники, инженеры прекращали попытки кардинально ускорить процесс пропитки. До последнего времени в литературе весьма категорично указывалось, что все дело в краевом угле  $\nu$ . При  $\nu < 90^\circ$  (жидкость смачивает твердую поверхность) пористые тела будут пропитываться, а при использовании жидкостей, которые образуют краевой угол более  $90^\circ$ , пропитки не будет. В учебнике по технологии переработки древесины можно встретить утверждения вроде: «Вода, заполняющая влагопроводящие пути древесины, практически несжимаема, и введение в такую древесину пропитывающих веществ в достаточном количестве, очевидно, невозможно». «Хотя создание большого избыточного давления — весьма эффективное средство введения в древесину жидкостей, однако оно не дает возможности производить сплошную пропитку древесины»; «Сырые сортаменты... требуют перед пропиткой проведения дополнительных операций по подготовке древесины».

Ну, а если рассуждать просто здраво: хорошо, капиллярные силы выталкивают несмачивающую жидкость. Но они же не бесконечно велики. В контейнер высокого давления, установленный на гидравлическом прессе, поместили пористые образцы и залили пропитывающей жидкостью при комнатной температуре, затем сжали жидкость с помощью уплотненного плунжера, который был укреплен на подвижной траверсе гидропресса. По достижении номинального давления делали выдержку — несколько секунд. Затем давление уменьшали до атмосферного и извлекали образцы из контейнера. Образцы взвешивались до и после пропитки.

Результаты были следующие:

Буковая древесина за 30 с поглотила 30% гипойдной смазки (по весу). Образцы той же древесины, оставленные для контроля на сутки в нагретой до 323 К гипойдной смазке, поглотили 17% минерального масла по весу; образцы электродного графита после выдержки в

30 с под давлением 1600 МПа — 10,3—11,3%, а контрольные образцы, находившиеся в течение суток в нагретой до 223 К гипойдной смазке, — только 4,4% минерального масла гораздо меньшей вязкости.

Для проверки возможности пропитки пористых материалов плохосмачивающими жидкостями образцы электродного графита пропитывали водой при давлении 1290 МПа и температуре 292 К с выдержкой 10 с. Контрольные образцы поместили на двое суток в воду с температурой 293 К. После пропитки под давлением вес образцов увеличился на 7,7%, а после естественной пропитки — на 1,7%. Образцы, пропитанные водой при давлении 2000 МПа с выдержкой 10 с, впитали 8,2% воды по весу.

Для проверки возможности пропитки материалов жидкими металлическими расплавами такой расплав залили в контейнер высокого давления с образцами. Затем в контейнер опустили уплотненный плунжер и создали давление в 500 МПа. Выдержка — 10 с. Изучение разрезов образцов показало, что произошла сквозная пропитка.

При обычной пропитке скорость процесса определяет скорость капиллярного подъема; объем и конфигурация пор не изменяются. При пропитке под высоким гидростатическим давлением капиллярные силы играют второстепенную роль, так как жидкость продавливается по порам. А поскольку давление пропитывающей жидкости превышает предел упругости материала пористого тела, поры деформируются и их объем и конфигурация изменяются таким образом, что уменьшается сопротивление проникновению жидкости.

В лаборатории износостойкости Государственного научно-исследовательского института машиноведения разработан способ заполнения (запрессовывания) фторопластом мелкопористых материалов. Существенно сокращено время пропитки; через поры прогоняется количество суспензии в объеме, намного превышающем начальный объем пор. При вакуумной же пропитке в поры попадает суспензия в объеме, несколько меньшем их объема. Кроме того, при пропитке под давлением можно использовать частично коагулировавшую суспензию, поскольку высокое давление разрушает «скопление» частиц, разделенных сольватными оболочками. Метод запрессовывания фторопласта применяется на Климовском



машиностроительном заводе, где установлены две полуавтоматические поточные линии.

**Пропитка пористых тел, поры которых заполнены жидкостью, подлежащей удалению.** В настоящее время пропитка пористых тел требует предварительного удаления из пор посторонней жидкости (например, сухой), что существенно удлиняет процесс и делает его многостадийным. Чтобы проверить возможности пропитки влажной древесины минеральным маслом, образцы сосны поместили в воду на 2 ч. В результате их масса увеличилась на 28%. Затем образцы поместили в контейнер высокого давления и 30 с выдерживали в гипондной смазке под давлением 1400—1200 МПа. Вес образцов увеличился по сравнению с исходным на 47%, а по сравнению с весом увлажненных образцов — на 14,5%; объем уменьшился на 28,7%. Разрез по поперечному сечению показал, что минеральное масло полностью вытеснило воду. Это объясняется сжимаемостью воды более чем на 20% при давлениях свыше 1000 МПа.

Но можно ли уменьшить давление пропитки и объем рабочей камеры? Да, можно. Разработан следующий способ. Пористое тело устанавливают в контейнер торцом к входному отверстию магистрали высокого давления. Герметизируют боковую поверхность пористого тела со стороны входного отверстия и проталкивают пропитывающую жидкость давлением, превышающим гидравлическое сопротивление. Она вытесняет заполнявшую поры жидкость через открытый торец. Когда из открытого торца начинает вытекать пропитывающий материал, давление снимают.

Принципиальное преимущество способа по сравнению со сплошной пропиткой в контейнере высокого давления — существенное уменьшение давления, так как для механического вытеснения через торец пористого изделия жидкости, заполнявшей поры, требуется значительно меньшее давление, чем для того, чтобы сжать жидкость в порах до 20% и более. Способ целесообразно использовать для пропитки сырой непросушенной древесины (в частности, железнодрожных шпал, мебельных изделий, шахтного крепежного леса и т. д.) антисептиками, лаками и консервантами.

Экономическая эффективность от внедрения описываемого способа (исключен длительный и энергоемкий процесс сушки, сокращено время пропитки, имеется воз-

можность использовать и высоковязкие жидкости без подогрева, а также плохосмачиваемые жидкости) только в одной лесоперерабатывающей промышленности может быть ориентировочно оценена в 10 млн. руб/г.

**Одновременная пропитка, уплотнение и профилирование.** Под высоким гидростатическим давлением объем пропитываемого тела, в частности древесины, существенно уменьшается, т. е. уплотняется пористый каркас. Это обстоятельство можно использовать для одновременной пропитки, уплотнения и профилирования пористой заготовки.

Заготовку вставляют проточенным на конус торцом в заходную воронку профилированной матрицы (на выходе из рабочей полости контейнера высокого давления) и продавливают через нее. Если скорость повышения давления пропитывающей жидкости в рабочей полости контейнера превысит скорость пропитки, сопротивление пластической деформации материала можно преодолеть и без прямого контакта плунжера с торцом заготовки. Так с помощью гидростатического давления пропитывающей жидкости можно одновременно пропитывать, уплотнять и профилировать пористые изделия, не удаляя посторонней жидкости (например, сырую древесину синтетическими лаками и смолами).

Область научного и практического использования пропитки под давлением чрезвычайно широка. Достигнутое в настоящее время давление (3000 МПа) при температуре до 600 К перекрывает огромный диапазон технологических процессов пропитки. Особенно перспективен метод в радиодеталестроении. Его применение делает пропитку высоковольтных пленочных конденсаторов более качественной.

Следует также иметь в виду и то, что при использовании способов пропитки под давлением не требуется повышать температуру пропитывающей жидкости. Следовательно, применять можно высоковязкие жидкости и жидкости, которые не терпят нагрева; можно пропитывать пористый материал, заполненный другой жидкостью без предварительного удаления последней.

**Пропитка под давлением и сверхпроводимость.** Способ пропитки под давлением может стать необходимым при решении задач высокотемпературной сверхпроводимости. Академик В. Л. Гинзбург писал: «Единственное практически интересное направление, связанное с идеей

об одномерной сверхпроводимости, которое мы видим в настоящее время, состоит в использовании нитевидных структур. Речь идет о химических соединениях, представляющих собой как бы совокупность проводящих нитей, «вложенных» в трехмерную направляющую матрицу. Проводимость таких соединений в одном направлении значительно больше проводимости в перпендикулярных направлениях».

Не углубляясь в теорию, отметим, что если высокопроводящий сплав, например ниобий-олово ( $\text{Nb}_3\text{Sn}$ ), у которого температура сверхпроводимости в обычном состоянии 21 К, продавить в виде весьма тонких (порядка нескольких ангстрем) нитей, то температура перехода в сверхпроводящее состояние существенно повысится. Это означает, что вместо жидкого гелия для охлаждения сверхпроводящих кабелей можно будет использовать жидкий водород, что примерно на порядок снижает требуемую хладопроизводительность рефрижераторов и их удельную стоимость на единицу отводимого тепла.

Ну, а где взять такие нитевидные структуры? Об этом позаботилась сама природа, создав цеолиты — пористые алюмосиликатные кристаллы, пронизанные каналами определенных размеров с поперечником отверстий приблизительно 4—10 Å. Да и известный всем асбест — пористый кристалл с параллельными порами-каналами, причем расстояние между центрами таких волокон в хризотиласбесте 150—500 Å. Заполнение пор таких кристаллов сверхпроводящими сплавами под высоким гидростатическим давлением позволит создать сверхмногожильные сверхпроводящие кабели с жидководородным, а возможно, и азотным охлаждением.

## Упрочнение

**Растяжение в сжатой жидкости.** Известно, что сопротивление усталости деталей, которые находятся под знакопеременной нагрузкой, можно повысить одно- или многократным растяжением за пределом текучести, так как сопутствующая растяжению пластическая деформация создает сжимающие остаточные напряжения. После того как статическая нагрузка снята, эти остаточные напряжения суммируются с переменными напряжениями рабочей нагрузки, уменьшаются абсолютные значения

последних и увеличивается благодаря этому усталостная прочность.

Советские исследователи В. С. Меськин и Л. А. Кирмаллов установили, что после одноосного растяжения на 1,0—1,5% предел пропорциональности закаленной на мартенсит стали повышается чуть ли не до предела прочности.

Но, без сомнения, самый эффективный способ такого рода упрочнения при сохранении достаточной пластичности (даже если это твердые и труднодеформируемые сплавы) — одноосное растяжение под высоким гидростатическим давлением. Выдающийся американский физик Перси Вильям Бриджмен во время второй мировой войны работал в Уотертаунском арсенале над повышением прочности брони. Он сделал открытие, которое положено в основу всех современных методов холодной обработки металлов давлением: пластичность металла определяется величиной гидростатического давления в зоне деформации. Если растягивать металлический пруток высоким гидростатическим давлением (порядка нескольких тысяч или даже десятков тысяч паскалей), можно резко повысить его прочность, сохранив достаточную пластичность.

В специальной установке были проведены эксперименты по растяжению образцов под гидростатическим давлением до 4200 МПа, они блестяще подтвердили гипотезу Бриджмена. Однако из-за сложности установки для создания высокого гидростатического давления с одновременным растяжением практически реализовать идею Бриджмена в промышленности не удавалось.

В последние годы как в отечественной, так и зарубежной научной периодике появились работы о влиянии высокого гидростатического давления на механические характеристики металлов. Здесь не было зафиксировано многократного увеличения прочности, но если даже речь шла о нескольких процентах, то, учитывая простоту технологии, такой способ упрочнения мог бы найти практическое применение.

После двухминутной выдержки стандартных разрывных образцов из стали 70, закаленных на мартенсит в жидкости, сжатой до 2700—2900 МПа (это давление превышало предел прочности закаленной стали), и плавном снижении давления в контейнере существенно

го изменения разрывной прочности образцов не наблюдалось.

Однажды, случайно, давление было резко снижено, и когда образцы извлекли из контейнера, на них обнаружили шейки. Характерный вид острого сужения шеек образцов и сопоставление их с фотографиями, сделанными П. В. Бриджменом, свидетельствовали о том, что образцы испытали одноосное растяжение под высоким гидростатическим давлением.

Выяснилось, что для упрочнения металла растяжением до остаточного удлинения  $\geq 1\%$  при высоком гидростатическом давлении необходимо, чтобы:

гидростатическое давление жидкости было равно или выше давления ее затвердевания;

выдержка образцов под давлением превышала время, необходимое для затвердевания жидкости;

соблюдалась определенная ориентация образцов относительно оси перемещения плунжера; продольная ось каждого образца, установленного в контейнере, должна быть параллельна оси плунжера.

Упрочнение растяжением в сжатой жидкости осуществляется следующим образом. Детали устанавливают в герметизированной снизу рабочей полости контейнера (желательно с ориентацией относительно усилия растяжения, действующего вдоль продольной оси контейнера) и заливают жидкостью. Затем в отверстие контейнера вводится уплотненный плунжер. Он давит на жидкость и создает в рабочей полости контейнера высокое гидростатическое давление. По достижении давления затвердевания жидкости 1200—1400 МПа делается выдержка, необходимая для теплоотвода и полного затвердевания.

После выдержки резко сбрасывается давление в рабочей полости контейнера (реверсированием хода плунжера). Вследствие этого сжатая и затвердевшая жидкость со скоростью распространения упругой деформации снова переходит в жидкое состояние. Она может увеличивать свой объем только в одном направлении — вверх, так как во всех других направлениях этому препятствуют стенки контейнера. Поэтому детали, находившиеся в жидкости, испытывают объемное напряженное состояние с двумя главными сжимающими напряжениями и одним растягивающим.

Эффективность упрочнения выше, если циклы затвердевания-разгрузки повторены несколько раз.

Образцы из стали 70 (катанка — заготовка для стальной канатной проволоки), закаленные, охлажденные в масле и «отпущенные» ( $\sigma_b = 1000—1100$  МПа,  $\sigma_t = 800—900$  МПа;  $\delta = 6—8\%$ ), после упрочнения описанным способом имели  $\sigma_b = 1300—1500$  МПа и  $\delta = 5—7\%$ , причем  $\sigma_t$  почти равнялось  $\sigma_b$ .

Следует иметь в виду, что при сжатии жидкости из-за изменения внутренней энергии и трения часть работы сжатия переходит в тепло. Оценить время, необходимое для теплоотвода и полного затвердевания жидкости, можно из общих термодинамических соображений.

Количество тепла  $Q$ , которое необходимо отнять у жидкости с удельной теплоемкостью  $C$ , начальной температурой  $t_1^0$  и температурой замерзания  $t_2^0$ , чтобы перевести его в твердое состояние, т. е. сжать до затвердевания, равно  $Q = mc(t_1^0 + t_2^0) + \lambda m$  для воды:  $\lambda = 80$  ккал/кг;  $t_2^0 = 273$  К и  $C = 1$  ккал/кг·град.

Количество протекающего через стенку тепла при установившемся тепловом потоке равно:

$$Q = kS \frac{t_1^0 - t_2^0}{l} \Theta,$$

где  $S$  — площадь поверхности стенки,  $m^2$ ;  $t_1^0$  и  $t_2^0$  — установившиеся температуры внутренней и наружной поверхности стенки контейнера;  $l$  — толщина стенки,  $m$ ;  $\Theta$  — время, в течение которого перемещалось тепло,  $ч$ ;  $K$  — коэффициент теплопроводности, для железа  $K = 40—50$  ккал/ $m \cdot ч \cdot град$ .

Решая оба уравнения, найдем расчетное время выдержки детали в воде под давлением. Например, при массе воды 0,1 кг, толщине стенки контейнера 0,06 м, площади поверхности контейнера 0,1  $m^2$ ; температуре внутренней и наружной поверхности контейнера соответственно 323 и 288 К оно составляет 13,4 с.

При повышении давления постепенно увеличивается вязкость жидкости (вследствие сближения молекул и ограничения свободы их движения в пределах объема вещества вплоть до затвердевания). Энергия, необходимая для сжатия единицы объема жидкости до затвердевания, т. е. работа сжатия при постоянной температуре, равна:  $W = - \int p \left( \frac{\partial U}{\partial p} \right) dp$ ,

где  $\frac{\partial U}{\partial p}$  — коэффициент сжатия;  $p$  — гидростатическое давление. Работа сжатия до затвердевания, например, 1 см<sup>3</sup> воды составляет 10,55 Дж.

Следует иметь в виду, что при затвердевании жидкости под давлением часть энергии затрачивается на фазовый переход — произведение давления перехода  $p$  на изменение объема  $\Delta V$ . Растягивающая нагрузка, действующая на детали при резком сбросе давления, весьма значительна, так как к энергии сжатой жидкости приплюсовывается и энергия, выделяющаяся при фазовом переходе. Усилие для растяжения металла за пределом текучести можно регулировать количеством жидкости в рабочей полости контейнера, точка затвердевания которой при упрочнении изделий из закаленной стали или тугоплавких и трудноформируемых сплавов должна лежать в пределах 1000—1200 МПа. Дело в том, что величина гидростатической поддержки при растяжении упрочняемого изделия должна быть выше порогового давления, после которого пластичность упрочняемого металла или сплава повышается.

Описанный способ имеет принципиальные преимущества по сравнению с существующими способами холодного упрочнения. Прежде всего значительно повышается производительность труда. Так как нет нагрева деталей, цикл упрочнения сокращается на два-три порядка (вместо часов — секунды), нет угара и окисления, улучшены санитарно-гигиенические условия труда. Упрочняющий эффект более высок.

Качество упрочнения зависит от величины растягивающего усилия, которое в обычных условиях не может намного превышать предел текучести. В данном случае его принимают выше 90% от предела текучести. Тогда в областях концентрации напряжений оно заведомо превосходит предел текучести. Это существенно повышает предел усталости изделий со сложной конфигурацией.

По сравнению с поверхностным наклепом, когда зона остаточных сжимающих напряжений сосредоточена в приповерхностном слое детали, одноосное растяжение до удлинения 1,0—1,5% под гидростатическим давлением после закалки на мартенсит позволяет получить сверхвысокий предел пропорциональности. Он ограни-

чен только пределом прочности (при удовлетворительной пластичности).

Кроме того, способ значительно проще реализовать, чем способ Бриджмена: упрощено оборудование и технические средства, меньше число операций (5 вместо 7), сокращен цикл упрочнения (нет, например, операций тонкой подгонки и регулировки давления).

Наконец, гидравлический материал — водопроводная вода, которая затвердевает при низком давлении; у Бриджмена — высококачественный бензин, он затвердевает при гораздо более высоком давлении. Аппаратура Бриджмена работала при 4200 МПа, в нашем случае давление определяется величиной порогового давления, при котором повышается пластичность деформируемого материала. Затвердевшая жидкость фиксирует изделие в направлении, нормальном растяжению при резком снятии давления. Поэтому при использовании легко затвердевающих жидкостей необходимое давление в 3—4 раза ниже, чем у Бриджмена.

Каковы принципиальные ограничения способа? Известно, что в деформации — удлинении — участвует вся деталь, равные части ее удлиняются примерно одинаково. Точно так же пропорционально уменьшаются площади поперечных сечений. Но когда усилие достигает определенной величины, деформация сосредоточивается в одном месте детали или образца. Это приводит к местному сужению поперечного сечения — образуется «шейка». Это и есть самое существенное ограничение данного способа упрочнения.

Коснемся номенклатуры деталей, которые целесообразно упрочнять описываемым способом. Прежде всего — закаленные болты и шпильки, ежегодный выпуск которых не одна тысяча тонн; резьбовые детали в свинченном состоянии (дело в том, что упрочнять их по отдельности традиционным растяжением было нецелесообразно, поскольку пластическая деформация в резьбе винта и гайки вызывала разброс в размерах, который затруднял свинчивание. Научные сотрудники Челябинского политехнического института А. Ф. Кармадонов и Л. В. Зандфос очень просто устранили это препятствие: они предложили их растягивать в свинченном состоянии. Но и здесь величина растягивающего усилия не может быть достаточно большой, есть опасения, что остаточные растягивающие напряжения в деталях со-

хранятся. Описываемый способ устраняет сомнения и опасения и существенно повышает усталостную прочность резьбовых соединений.) Звенья и пальцы цепей, потребность в которых огромная. Наконец, пружины, которые сейчас упрочняются после навивки заневоливанием — длительным нагружением, превышающим рабочую нагрузку и многие другие массовые детали (оси, валки, пальцы, втулки и т. п.).

«Закалка» стали давлением. Из курса металловедения известно, что закалка — термическая операция (нагрев выше температуры полиморфного превращения и последующее достаточно быстрое охлаждение) получения структурно неустойчивого (метастабильного) состояния металла. Твердый раствор углерода в  $\gamma$ -железе — аустенит — устойчив лишь при температурах 1000—1200 К (в зависимости от содержания углерода). Однако при очень быстром охлаждении аустенит не распадается, вместо этого в стали образуются игольчатые кристаллы новой фазы — твердого раствора с тетрагональной решеткой (мартенсита) особо высокой твердости. Эта промежуточная фаза метастабильна и распадается при отпуске — медленном нагреве до 530—580 К.

Тот же Бриджмен показал, что изменение межатомных расстояний и взаимодействий при изменении давления может быть более эффективным, чем изменение температуры. Иными словами, плотность веществ при значительных давлениях больше их плотности при абсолютном нуле и атмосферном давлении. А это указывает на деформацию молекул и атомов, которая отражается на физико-химических свойствах сжатых веществ.

Известные ученые П. Джонсон, Б. Стейн и Р. Дэвис экспериментально подтвердили, что применительно к стали иголки мартенсита могут образоваться и при комнатной температуре, если давление при полиморфном переходе будет 13 тыс. МПа. Следовательно, холодная закалка стали принципиально возможна, любые металлы и сплавы можно закалывать давлением. Но давление это достаточно большое, и реализовать его в объеме хотя бы 1000 см<sup>3</sup> до последнего времени не представлялось возможным.

Известен патент на способ создания сверхвысоких давлений с помощью энергии полиморфных переходов некоторых легкоплавких металлов, например висмута. Висмут при давлении 2540 МПа скачкообразно умень-

шает свой объем на 9%. Если поместить деталь в оболочку из висмута (попросту залить расплавленным металлом), полученный блок — в контейнер, заполненный труднозамерзаемой жидкостью, например бензином, и сжимать эту жидкость уплотненным плунжером, то при давлении 2540 МПа произойдет полиморфный переход висмута и объем его уменьшится. Деталь будет сжиматься со всех сторон давлением, существенно превышающим 2450 МПа в рабочей камере контейнера. Причем оболочка не обязательно должна быть из чистого висмута. Она может быть выполнена, например, из легкоплавкого висмутосодержащего сплава (скажем, из эвтектического сплава висмут — свинец — олово с температурой плавления ниже 400 К). В этом случае чтобы удалить оболочку, деталь помещают в кипящую воду.

Упрочняющий эффект «сверхобжата» весьма высок. Так, предел текучести чистого железа увеличился со 105 до 315 МПа, никеля — с 38,5 до 106, бериллия — на 50%, дисперсионно упрочненного хрома — на 35%. Причем во всех случаях существенно возросла пластичность.

Улучшаются и другие прочностные показатели. Например, разрывная прочность чистого железа возрастает с 210 до 315 МПа, твердость — на десять единиц по Виккерсу, сопротивление усталости — в несколько раз, ползучесть при высоких температурах уменьшается на 80%.

Наиболее осязаемая область применения сверхобжата — повышение стойкости стального металлорежущего инструмента. Дело в том, что при закалке металлорежущего инструмента далеко не весь аустенит переходит в мартенсит. Высокое давление активизирует остаточный аустенит, и появляется возможность превратить его независимо от степени стабилизации в мартенсит. Кроме того, деформации и напряжения, возникающие в инструментальной стали, измельчают карбиды, что упрочняет сталь.

## Пластическое формоизменение

Что такое ПФВГД? Основное преимущество пластического формоизменения металлов и сплавов под высо-



ким гидростатическим давлением (ПФВГД) по сравнению со всеми существующими методами металлообработки в том, что сложная, длительная и многостадийная технология изготовления изделия (горячая —ковка, холодная — резание, термическая, отделочная, — шлифование, полирование) заменяется одностадийным процессом получения готового изделия, причем упрочненного, с высокой чистотой поверхности, прямо из заготовки. Рабочий цикл определяется временем сборки и разборки оснастки: само пластическое формоизменение под высоким давлением идет со скоростью десятков метров в секунду. Кроме того, при ПФВГД сокращается энергия, затрачиваемая на преодоление сил трения между заготовкой, стенками пуансона, контейнера и матрицы. При обычном прессовании несколько больше энергии приходится затрачивать и на непосредственное деформирование заготовки.

При всестороннем неравномерном сжатии, характерном для ПФВГД, удастся деформировать малопластичные металлы и сплавы. Детали, изготовленные методом ПФВГД, отличаются повышенной прочностью. Существенно улучшается и структура металла. Микрофотография шлифов показывает, что зерна металла вытягиваются в направлении истечения; примеси, которые в отожженном образце в основном расположены по границам зерен, в процессе деформации сильно дробятся, но остаются, как правило, там же, на границах зерен — при ПФВГД распределение деформаций по сечению более однородно.

Диапазон технологических схем ПФВГД чрезвычайно широк. Ведь среда — формирующий инструмент — может быть сжатой жидкостью, газом, упругим телом (резина), твердым телом, магнитным полем. А само пластическое формоизменение реализуется с гидростатическим противодавлением и без, с напряженным состоянием сжатия, сдвига, растяжения и в их разнообразных комбинациях. Только для растяжения и сжатия известно 45 основных схем ПФВГД (из них самый распространенный — гидроэкструзия).

(Следует иметь в виду, что при реальных условиях деформирования металла схемы напряженного состояния в разных точках очага деформации различны и понятия «волочение», «прессование», «гидроэкструзия» в известной степени условны. Это показал выдающийся

советский ученый С. И. Губкин, разработавший обобщенную диаграмму видов напряженного состояния.

Из диаграммы следует, например, что при растяжении (волочении проволоки) в очаге деформации могут появляться напряжения сжатия. Ближе к выходу из волоки напряженное состояние — типа линейного растяжения, а к входу — равномерного сжатия. В зависимости от условий волочения относительное среднее напряжение у выхода из волоки может быть и напряжением сжатия.

Та же диаграмма показывает, что при гидроэкструзии проволоки возможно появление напряженных состояний как в области трехосного сжатия, так и в области объемных разноименных напряженных состояний с преобладанием растяжения. Например, при «классической» гидроэкструзии нарушение схемы всестороннего неравномерного сжатия происходит из-за неравномерности течения металла в объеме очага деформации (матричной воронки). Экспериментальные и теоретические работы Л. В. Прозорова, А. А. Коставы и Б. Авицура показали, что нормальное напряжение при выходе из матриц в области, близкой к оси прессования, становится растягивающим и, следовательно, понижает среднее гидростатическое давление. Это может привести к образованию трещин и даже к разрушению заготовки. Даже у не обладающего деформационным упрочнением несжимаемого идеально-пластического материала при прессовании или волочении с определенными соотношениями угла конуса матрицы, степени деформации и коэффициента трения появляются внутренние разрывы.

Таким образом, чтобы реализовать принципиальные преимущества ПФВГД, необходимо совместить схему трехосного неравномерного сжатия с гидродинамическим режимом смазки и добиться стабильности процесса).

Для реализации ПФВГД был разработан **гидравлический компрессор высокого давления** (в Институте физики высоких давлений АН СССР). Это непрерывно действующая, высоконадежная и удобная в эксплуатации машина с приводом от электродвигателя. Он предназначен для создания гидростатического давления до 1600 МПа практически в любом объеме. Использование компрессора при ПФВГД позволяет освоить в промышленности ряд технологических процессов, в частности обработку трудно деформируемых металлов и сплавов,

гидростатическую штамповку, вытяжку, формовку, гибку, раздачу и т. п., сократить капиталовложения, уменьшить необходимые производственные площади, сделать процесс ПФВГД более гибким и универсальным.

Гидрокомпрессор — плунжерная машина с одним вертикально расположенным цилиндром. Число ходов плунжера — 240 в минуту. Рабочий ход его — 30 мм, диаметр — 30 мм, производительность — 20 л/ч при давлении 600 МПа, 10 л/ч при давлении 1600 МПа. Давление во всасывающей системе — 1,0—1,5 МПа. Рабочая сжимаемая жидкость: 90% керосина и 10% трансформаторного масла. Смазывают плунжер рабочей жидкостью, привод его — электродвигатель в 16 кВт.

Советские ученые А. Я. Чепоров и Е. С. Сизов показали, что на одной конструктивной базе можно создать оборудование для всех основных процессов обработки металлов в условиях высокого гидростатического давления и процессов гидростатического прессования изделий из порошковых материалов. Они разработали классификацию способов формообразования деталей. В ней пять критериев классификационного разбienia:

- тип пуансона (жесткий, гидростатический);
- тип матрицы (жесткая глухая, жесткая сквозная, гидростатическая);
- вид заготовки (объемная сплошная, трубчатая, листовая);
- сущность процесса деформирования (объемная штамповка, выдавливание, вытяжка, обжатие или раздача трубчатых заготовок, гидростатическое прессование и т. п.);
- характер воздействия гидростатического давления.

Проведенный анализ конструктивно-технологических схем показал, что они могут быть сгруппированы по ряду общих признаков. Это позволило разработать пять основных групповых схем, перекрывающих весь диапазон практических способов формообразования деталей в условиях высокого гидростатического давления.

На основе таких схем созданы установки высокого давления СВД-1 на рабочее давление 800 МПа, СВД-3 и СВД-4 — до 1200 МПа, каждая из которых может выполнять самые разнообразные работы. Причем использование мультипликатора в СВД-3 позволяет поднять давление до 25 000 МПа.

В установках СВД процессы загрузки-выгрузки максимально упрощены, так как штамповая оснастка размещена в корпусе затвора и устанавливается (извлекается) вместе с затвором с помощью кольцевого гидроцилиндра.

Регулировать давление и компенсировать изменение объемов рабочей полости контейнера позволяет одноходовой мультипликатор.

Предварительное давление создается гидравлическим компрессором. Это позволяет заранее учесть сжимаемость рабочей жидкости и изменения рабочей полости контейнера. Для регулирования процесса в отсекаемых гидравлическими вентилями зонах высокого давления используется специальный регулятор.

В американских машинах для ПФВГД применяют одноступенчатые мультипликаторы давления: в поршневой полости — 700 МПа, в рабочей полости контейнера высокого давления — 28000 МПа. Столь высокое (в промышленной практике) давление рабочей жидкости позволяет реализовать однопроцессные способы ПФВГД, обеспечивающие значительную экономию средств в связи с сокращением числа операций и расхода материала, уменьшением до минимума (или полным устранением) числа операций последующей обработки, повышением деформируемости металлов и сплавов, механических свойств готовых изделий и т. д.

**Рабочая жидкость для ПФВГД.** П. В. Бриджмен писал: «Я наблюдал такой эффект. При самых высоких давлениях металл, вместо того чтобы выходить плавно, начинает выбрасываться отдельными кусками. Необходимо найти причину выбрасывания металла при самых высоких давлениях и метод устранения этого явления».

Прошло лишь три года после опубликования на русском языке монографии П. В. Бриджмена, и в объеме академического журнала появляется весьма лаконичная — на двух страницах — статья Б. И. Береснева, Л. Ф. Верещагина и Ю. Н. Рябинина «Роль среды при выдавливании металлов жидкостью высокого давления». Но значение этой статьи было обратно пропорционально ее объему. В ней объясняются причины неудач П. В. Бриджмена: дело, оказывается, в правильном выборе среды — жидкости, передающей давление.

Жидкость не только влияет на величину давления, необходимую для осуществления процесса истечения ме-

талла через матрицу, но и определяет качество получаемого изделия. Выяснилось, что чем больше вязкость рабочей жидкости, тем ниже давление, но и хуже качество поверхности. Самая дешевая жидкость — вода — давала отличное качество поверхности, но при давлении, в 1,5 раза превышающем эту же величину при использовании высоковязкой жидкости — гипонидной смазки. «Применение неподходящей жидкости может привести не только к порче поверхности выдавливаемого металла, но и к полному его разрушению», — так заканчивалась статья.

Эксперименты показали, что при использовании жидкости малой вязкости возникают еще две неприятности: снижается герметичность уплотнений и появляются задирки на инструменте.

В общем, к «идеальной» жидкости для ПФВГД предъявляются два взаимоисключающих требования: первое — в зоне действия ее на заготовку жидкость должна быть маловязкой и хорошо передавать высокое гидростатическое давление; второе — в зоне герметизации и трения (на входе плунжера в контейнер) жидкость должна быть высоковязкой с хорошими смазочными свойствами.

Возникла идея сделать «коктейль», т. е. жидкость из различных компонентов. Попробовали — и все прошло отлично. После установки матрицы с заготовкой, на уплотнительные кольца которой нанесен слой консистентной смазки, в рабочую полость контейнера для ПФВГД заливается маловязкая рабочая жидкость — вода с растворенными или эмульгированными в ней поверхностно-активными присадками. Когда уровень воды достигнет требуемой высоты, определяющейся высотой заготовки и высотой слоя жидкости над ней с учетом сжимаемости (при давлениях порядка 1200 МПа вода сжимается на 21%), в полость контейнера заливается слой высоковязкой жидкости с плотностью ниже плотности воды и с хорошими смазочными свойствами (например, известное всем автолюбителям минеральное масло марки СУ).

Затем опускается плунжер, сжимающий рабочую жидкость, слой высоковязкой смазочной жидкости проникает в зазор между плунжером и стенкой контейнера, это гарантирует необходимый режим жидкостного трения.

Использование в качестве рабочей среды несмешивающихся жидкостей с различной вязкостью, из которых высоковязкую располагают над маловязкой, может успешно применяться при гидростатическом тонком измельчении, гидростатическом прессовании в порошковой металлургии и керамическом производстве, а также при гидроформинге — штамповке металлов и сплавов жидкостью высокого давления.

**Снижение начального давления при гидроэкструзии.** Известно, что начальное давление при ПФВГД значительно (на 20—50%) выше давления, необходимого для установившегося процесса. Это обстоятельство особенно осложняет гидропрессование длинномерных заготовок из труднодеформируемых металлов и сплавов. Необходимость повысить начальное давление ограничивает промышленное применение ПФВГД — не выдерживают контейнеры.

Известно также несколько способов создания добавочного давления в начале ПФВГД. Принцип одного из них — создание кратковременного импульса давления с помощью искрового разряда в рабочей жидкости. Но в этом случае приходится оснащать ПФВГД-установки электрическим оборудованием, размещение же электрических вводов в рабочую полость контейнера усложняет и его конструкцию и устройства герметизации.

Можно без ущерба для процесса снизить начальное давление без специального оборудования исключительно изменением конфигурации конца заготовки. Диаметр его уменьшают до такого размера, при котором пластическое деформирование входной части заготовки идет за счет частичного перехода потенциальной энергии сжатой жидкости в кинетическую энергию движения заготовки. Поскольку коэффициент трения скольжения меньше коэффициента статического трения, при входе утолщенной части заготовки в матричную воронку достаточно незначительно повысить давление рабочей жидкости, чтобы проэкструдировать и утолщенную часть заготовки. Роль «инициатора» процесса гидроэкструзии отводится утонченному концу заготовки.

**Принцип инверсии в ПФВГД.** Одна из причин, препятствующих внедрению гидроэкструзии, — трудоемкость изготовления и дороговизна профильных матриц из штамповых сталей. Многим знаком метод холодного выдавливания рабочих полостей пресс-форм. Но приме-

нить его для изготовления профильных матриц ПФВГД невозможно: во-первых, он не годится для получения просечек, т. е. сквозных да еще к тому же профильных отверстий; во-вторых, глубина выдавливаемой полости ограничивается прочностью пуансона и поэтому не должна превышать половины его поперечного сечения; в-третьих, удельные давления даже для пластичных сталей близки к 3000 МПа, а для матричных сталей — еще выше; в-четвертых, усилие выдавливания резко возрастает с глубиной. Поэтому профильные отверстия матриц прошивают на электроимпульсных станках, а последующие доводка и полировка — ручные. Можно, однако, использовать для прошивки неотъемлемую часть установки ПФВГД — гидравлический пресс, а также оснастку, выдерживающую огромные давления, — контейнер для ПФВГД.

Однажды по недосмотру в контейнер поставили незакаленную матрицу, а заготовка была из проволоочной стали с твердостью 30 НРС. Выдавливания, разумеется, не произошло. Но когда вытащили матрицу из контейнера, увидели, что она деформировалась вокруг совершенно нестронутой заготовки, причем без единой трещины. Тогда и решили использовать принцип инверсии. При обычном ПФВГД матрица неподвижна (движется заготовка). Нужно зафиксировать заготовку, в данном случае пуансон требуемого профиля из закаленной стали, а продавливать матрицу из отожженной стали. А когда пуансон прошьет матрицу — закалить ее.

Чтобы при повышении давления в контейнере жидкость не просачивалась через заднюю часть оправки, отверстие в заготовке матрицы делается не сквозным, а глухим, т. е. оставляют небольшую по толщине перемычку. Процесс получения профильного отверстия протекает в три стадии (рис. 6).

I. Рабочая жидкость 1 при опускании плунжера 2 давит на заготовку матрицы 3. Наличие перемычки 4 обуславливает предварительную осадку заготовки на заднюю часть оправки 5.

II. Когда давление жидкости станет достаточно большим, оправка высасывает перемычку — происходит пластическая деформация заготовки матрицы. Стрелками показано прямое воздействие жидкости на деформируемый металл заготовки.

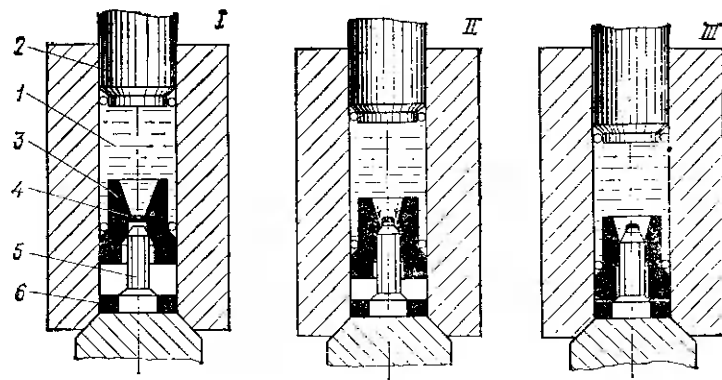


Рис. 6. Схема обратной гидроэкструзии

III. Окончание процесса получения профильного отверстия в заготовке; она опустилась в крайнее нижнее положение до упора в кольцо 6.

Изюминка здесь в том, что рабочая жидкость — не только среда, передающая давление, она осуществляет и гидростатическую поддержку наружной недеформируемой части заготовки матрицы. О том, что это действительно так, свидетельствуют факты. При попытках прошить отверстие в заготовке обычным способом холодного выдавливания на внутренних гранях профильного отверстия возникли трещины. Когда же прошивку этого отверстия в том же материале стали выполнять методом «обратной» гидроэкструзии — трещины исчезли.

После прошивки-гидроэкструзии заготовку матрицы термообрабатывают, и на этом цикл ее изготовления заканчивается. При необходимости изготовить матрицы со спиральным профилем торец хвостовой части оправки-пуансона покрывают твердой смазкой на основе бисульфида молибдена — уменьшается сопротивление вращению.

*Повышение твердости мягких металлов и сплавов.* Расширение рабочего диапазона высокочастотных электровакуумных приборов (камертоны, лампы обратной волны и т. д.) в области ультравысоких частот ограничено спецификой изготовления замедляющих систем из вакуумных высокопроводящих материалов. Детали должны иметь весьма короткий пространственный пе-

риод и высокий класс точности изготовления, что трудно из-за низкой твердости указанных материалов.

Низкая твердость, а стало быть, и прочность мягких металлов, в частности химически чистого алюминия, затрудняют их использование в качестве гиперпроводников, у которых активное сопротивление при 20 К снижается на три порядка по сравнению с комнатной температурой. Применение существующих методов наклепа в данном случае оказывается малоэффективным.

Советские ученые Б. И. Береснев, Л. Ф. Верещагин и Ю. Н. Рябинин в работе «Изменение механических свойств цветных металлов и сплавов при выдавливании их жидкостью высокого давления» отметили, что у цветных металлов прочность, а следовательно, и твердость возрастают, если их предварительно подвергнуть ПФВГД (в частности, гидроэкструзии).

Эксперименты показали, что вследствие разогрева металла при деформации с высокой скоростью начинается разупрочнение, и поэтому гидроэкструзия даже с весьма высокой степенью деформаций за один цикл не дает нужного повышения твердости экструдата. Более того, из-за большой величины энергии деформации происходит настолько сильный разогрев металла, что медные экструдаты выходят из матрицы в рекристаллизованном состоянии.

Наилучших результатов достигали при гидроэкструзии с единичными деформациями по закону убывающей геометрической прогрессии. Реализация этого способа повышения твердости не бескислородной меди (исходная твердость по Бринелю 50,9 НВ) позволила получить образцы с твердостью 129 НВ. Таким образом, ПФВГД с постепенно убывающими по закону геометрической прогрессии частными степенями деформации «делает» из мягких металлов металлы с твердостью стали.

**Прецизионные конусности — давлением<sup>1</sup>.** Один из неписаных законов машиностроения гласит: «Если хочешь избежать течи в разъемах трубопроводов — делай их конусными». Такими выполняют не только разъемные соединения трубопроводов и рукавов высокого давления гидравлических систем машин, станков, двигате-

<sup>1</sup> Хотя в этом процессе используется динамическое давление, из-за весьма малого объема деформируемого металла (порядка 1 мм<sup>3</sup>) технологическое воздействие происходит при установившемся термодинамическом равновесии.

лей, но и клапаны, вентили, а также многие другие детали, которые для герметичности изготавливают в виде точно сопрягаемых соосных поверхностей конуса и шара. Причина простая — в конусном уплотнении удельные давления при тех же осевых усилиях выше, чем в плоском, поэтому оно обеспечивает лучшую герметичность. Однако за это приходится расплачиваться повышенной трудоемкостью изготовления и оснастки.

Учитывая, что годовая потребность в деталях с размерными конусными поверхностями исчисляется миллионами штук, снижение трудоемкости изготовления таких поверхностей — актуальная задача многих отраслей промышленности.

Но дело не только в трудоемкости изготовления. Для увеличения срока службы конусные поверхности плотных соединений должны иметь высокую твердость, т. е. их нужно упрочнять. Способов упрочнения поверхностей, в том числе и конусных, продумано много. Например, наклеп роликами, дробью или гидроабразивной струей. Но прежде чем их применить, конусную поверхность нужно выточить. А для упрочнения весьма узких поверхностей, точнее, фасок типа «седло клапана» (к примеру, максимальная ширина фаски в вентилях высокого давления 0,6 мм, а минимальная — 0,08—0,1 мм), и малого внутреннего диаметра (в электрогидроклапанах внутренний диаметр фаски — 4 мм) существующие способы упрочнения вообще непригодны, так как не гарантируют сохранения геометрии фаски.

С помощью ПФВГД проблему получения упрочненных размерных конусных поверхностей можно решить просто и изящно.

Известно, что при приложении к твердому телу давления с большей скоростью, если это давление существенно превышает предел текучести данного твердого тела — оно ведет себя как жидкость. Кроме того, в результате высокой степени пластической деформации и местного — локального — разогрева поверхностного слоя в металле происходят фазовые превращения. На различной глубине от контактной поверхности образуются слои различной структуры, происходят связанные с фазовыми превращениями неодинаковые объемные изменения и возникают остаточные напряжения разного знака. Поскольку различные структуры имеют разный удельный объем, характер остаточных напряжений в по-



верхностных слоях резко изменяется. Так, у стали распад аустенита и возникновение мартенсита вызывают остаточные сжимающие напряжения, поскольку удельный объем у мартенсита больше, чем у аустенита.

Анализ взаимодействия конусного пуансона с металлом показывает, что кроме сил сжатия и сдвига при вдавливании пуансона деформированный металл находится под действием силы трения. Если скорость движения пуансона невелика, в области контакта под действием силы трения и высокого давления образуется зона заторможенного металла. Он перемещается вместе с инструментом и выдавливается в отверстие. Удалить его можно лишь дополнительной обработкой отверстия после выдавливания.

Если же скорость формообразующего инструмента достаточно велика (более 1 м/с), то деформированный металл выдавливается в сторону отверстия в виде мелких брызг и нарост не образуется.

Наклеп от динамического сжатия определяется конусностью инструмента. С повышением угла конусности наклеп становится больше, и при 180° вся энергия удара переходит в энергию пластического деформирования.

Для реализации описанного процесса изготовили приспособление, которое при чрезвычайной простоте конструкции позволяет получать прецизионную и одновременно упрочненную поверхность. Приспособление состоит из основания с опорной втулкой, куда устанавливается обрабатываемая деталь, формообразующего инструмента — бойка ударной бабы,двигающейся внутри вертикального цилиндрического копра. Чтобы энергия удара строго дозировалась, в верхней части бабы укреплен круглый стержень с пазами, в которые попадает защелка фиксатора. Наконечник бойка из твердого сплава отшлифован и полирован.

Ударная баба устанавливается на высоте, которая определяется необходимой шириной конусной поверхности. При повороте защелки фиксатора баба падает вниз, бьет по головке бойка. При этом конусная часть бойка деформирует кромку отверстия детали, получается полированная и упрочненная конусная поверхность или фаска требуемой геометрии.

Ширина фаски при заданной конусности (в конечном счете объем деформированного металла) строго

пропорциональна энергии удара. При конусности 90—120° энергия удара примерно равна 1 Дж мм<sup>3</sup>. Замеры микротвердости образовавшейся конической поверхности показали, что относительное упрочнение достигает 30%.

Экономическая эффективность предложенного способа (по сравнению с изготовлением на токарном станке) весьма высока: производительность возрастает по меньшей мере раз в двадцать, а если учесть операцию упрочнения, то еще больше. Способ отличается простотой оснастки (ее можно изготовить своими силами в любой мастерской), не требует специальной квалификации обслуживающего персонала и может «работать» с металлами любой твердости (успешно «набивались» фаски на седлах клапанов из закаленной стали ШХ-15 с твердостью 60—62 HRC).

Экономические преимущества ПФВГД тем выше, чем более массово производство. Это хорошо иллюстрируется опытом **холодного выдавливания стальных шестерен со спиральными зубьями** (типа паразитных шестерен планетарных коробок передач легковых автомобилей), на заводах концерна «Форд». До 1976 г. — шестерни изготавливали механической обработкой — зубонарезанием и шевингованием.

Новый процесс начинается с получения цилиндрической заготовки с центральным отверстием. Технико-экономический анализ всех возможных способов — сверления цилиндрической заготовки, спекания металлокерамики, отрезки от трубы и др. — показал, что наиболее экономичным является гидростатическое обратное выдавливание стакана с протечкой дна.

Заготовки подаются к штампу для холодного выдавливания шестерен со сборным пуансоном (втулка и игла). Рабочая вставка матрицы имеет форму шестерни с внутренними спиральными зубьями, обработанными электроэрозионным способом.

Первым ходом пуансона зубья начинают выдавливаться, калибруется отверстие. При обратном ходе частично выдавленная заготовка остается в матрице. Окончательно выдавливается изделие при втором ходе, после загрузки в матрицу следующей заготовки.

Полученные детали требуют минимальной механической обработки: по торцам, снимается избыточная длина, удаляются заусенцы. Точность изготовления достой-

на удивления: она находится в пределах от  $+0,04$  до  $+0,08$  мм по профилю зуба и  $-0,06$  мм по шагу.

После зубонарезания шестерни шевингуют или применяют поверхностную пластическую деформацию. Все это для того, чтобы получить точность по профилю и шагу в пределах  $\pm 0,01$  мм, предусмотренную техническими условиями. После ПФВГД американцы предпочитают применять в качестве финишной операции шевингование, так как считают, что наклеп может вызвать нежелательные напряжения.

При гидромеханической штамповке-вытяжке деформирует заготовку рабочая жидкость в полости матрицы. Процесс может быть организован с вытеснением избытка рабочей жидкости либо через дроссельные устройства, либо через вытяжной зазор. Как показал советский ученый А. С. Чаузов, наиболее перспективна последняя схема. Она позволяет интенсифицировать процесс формоизменения при изготовлении как цилиндрических, так и сферических, конических и параболических изделий и повысить их качество. Кроме того, поскольку нет контакта заготовки с зеркалом матрицы, снижаются опасные растягивающие напряжения в штампуемых заготовках. Интересно отметить, что давление рабочей жидкости при вытяжке с отводом избытка ее через вытяжной зазор регулируется автоматически и величина его определяется условиями деформации заготовки.

Технологические возможности процесса гидромеханической вытяжки были проверены при изготовлении изделий разнообразной конфигурации из сталей, пермаллоя, меди, латуни, алюминия, ниобия и тантала. В качестве рабочей жидкости использовалось машинное масло марок МС и ИС-45. Гидромеханическая вытяжка гарантирует более равномерное распределение деформаций в боковых стенках изделий как из изотропных, так и из анизотропных материалов.

Сам процесс пластического формоизменения весьма эффективен. Ступенчатые оси длиной 203,2 мм ранее получали в пять этапов: три операции выдавливания и две высадки. Ныне это же изделие изготавливают за одну операцию прямого выдавливания и высадки. Массовую деталь штепсельного разъема длиной 50,8 мм в виде полый втулки с полым отростком в дне ранее сваривали из двух частей, затем сверлили отверстие и фрезеровали паз. С помощью ПФВГД разъем получают раздачей с

одновременной пробивкой отверстий за одну операцию. Медные гильзы с донышком при отношении длины к диаметру от 3:1 до 10:1 ранее приходилось сваривать две детали разных диаметров, а затем сверлить отверстия. Сегодня это одна операция — глубокая вытяжка.

**Пробивка-вырубка металла жидким пуансоном.** Обычный процесс пробивки и вырубки металлических листов — пуансон вдавливает отделяемую часть заготовки в отверстие матрицы. Этот способ принципиально ограничен прочностью материала пуансона. Максимальное допускаемое напряжение в пробивных пуансонах из инструментальных сталей — 2000 МПа.

Особенно плохо обстоит дело с одновременной пробивкой-вырубкой несколькими пуансонами, например, при изготовлении сит сельскохозяйственных машин и химических аппаратов. Преждевременный выход из строя хотя бы одного пуансона в штампе (а это неизбежно из-за разброса в стойкости) заставляет прекращать всю операцию и ведет к простоям оборудования.

Это сводит на нет основное преимущество пробивки-вырубки пуансоном — высокую производительность и низкую себестоимость. Фактическая стойкость многопуансонной оснастки в 4—10 раз ниже нормативной. Необходимость останавливать прессы или штамповочные линии для ее смены приводит к большим — 10—50% — потерям рабочего времени. Расходы на инструмент повышаются почти на 20%.

Известен способ пробивки отверстий сосредоточенным зарядом взрывчатого вещества в воде, но и он ограничен по многим параметрам.

Кардинально решить проблему можно пробивкой-вырубкой «жидким» пуансоном. Жидкость под высоким давлением затвердевает, и если пуансон заменить уплотненным плунжером, а между плунжером и пробиваемым материалом поместить жидкость, пуансоном можно считать сжатую и затвердевшую жидкость.

Было изготовлено приспособление к гидравлическому прессу: корпус, в котором установлена матрица. Над отверстием матрицы располагают заготовку. К ней плотно прижат прижимной втулкой торец плунжерной втулки. В подплунжерную полость заливается рабочая жидкость — минеральное масло, вставляется плунжер и все приспособление помещается на гидравлический

пресс. Рабочая жидкость сжимается до величины, превышающей предел прочности пробиваемого материала.

Результаты экспериментов показали, что так пробиваются металлы и сплавы с отношением длины заготовки к диаметру большим 2. Причем одновременно с пробивкой можно получать отверстие со скругленной фаской. Отсутствие прямого контакта плунжера с обрабатываемым металлом значительно повышает эксплуатационную стойкость оснастки. Кроме того, при пробивке отверстий жидкостью требуется меньшее удельное давление, поскольку при одних и тех же удельном давлении и относительной толщине отверстия отделение материала происходит при напряжениях 0,6 от величины, соответствующей пробивке пуансоном.

Минимальный объем рабочей жидкости из энергетических соображений должен быть равен удвоенному объему выдавливаемого металла. С учетом сжимаемости жидкости и компенсации первоначальных утечек его принимают порядка 2,4—2,8 объема металла.

Если иметь в виду, что стойкость вырубно-пробивных штампов возрастает по меньшей мере на 25%, внедрение беспуансонного способа пробивки-вырубки жидкостью даст огромный экономический эффект в соответствующих производствах.

Мы уже говорили, что одной из весьма эффективных схем ПФВГД является гидроэкструзия. Но в своем первоначальном виде она пригодна только для работы с заготовками ограниченной длины и не может быть использована для получения непрерывных профилей типа проката. Необходимо, стало быть, **непрерывная гидроэкструзия (НГЭ).**

Суть непрерывной гидроэкструзии: заготовка неограниченной длины подается в контейнер высокого давления через уплотнения в одном конце его; одновременно происходят экструзия передней части заготовки через матрицу в другом конце и наматывание конечного продукта на барабан приемного устройства.

Непрерывную гидроэкструзию не следует смешивать с волочением под высоким гидростатическим давлением. При волочении проволока деформируется приложенным извне тянущим-растягивающим усилием. При непрерывной гидроэкструзии деформация происходит под действием выдавливающего-сжимающего давления жидкости внутри контейнера.

Трудности в реализации НГЭ связаны с тем, что необходимы такие уплотнения, чтобы заготовка поступала в контейнер без его разгерметизации и в то же время чтобы они не позволяли вытолкнуть заготовку рабочим давлением.

Обойти эти трудности позволяет **полунепрерывная гидроэкструзия (ПНГЭ).** В процессе участвует не вся заготовка, а лишь небольшая ее часть. Заготовка подается в контейнер порциями через уплотнения, причем во время загрузки контейнера давление в нем атмосферное. После подачи заготовки на определенную длину зажимные и уплотнительные устройства фиксируют ее в контейнере и препятствуют выдавливанию через уплотнительные устройства с входной стороны контейнера.

После того как часть заготовки, находящаяся в контейнере, «проэкструдирована», контейнер разгерметизируют, подают очередную «порцию» заготовки и цикл повторяется.

Существенный недостаток таких устройств — изгиб заготовки перед каждым циклом гидроэкструзии. Был разработан улучшенный вариант: вместо одного сплошного установили два концентрических кольцевых плунжера. Жидкость сжимают наружным кольцевым плунжером, он перемещается относительно неподвижного внутреннего с закрепленной в нем матрицей. Так как последний неподвижен, заготовка во время набора давления остается прямой. Как только давление достигнет величины, необходимой для гидроэкструзии, начинает перемещаться внутренний плунжер, компенсируя сокращение длины заготовки между матрицей в одном конце контейнера и зажимным устройством в другом.

Установка ПНГЭ использует принцип так называемой усилительной гидроэкструзии: процесс происходит не только под действием высокого давления окружающей жидкости, но и с помощью осевого усилия, которое прикладывают к заготовке каким-либо механическим способом. Это позволяет снизить давление гидроэкструзии и скорость выхода экструдата, облегчает работу вспомогательных устройств, повышает степень деформации заготовки за один цикл.

Основной элемент установки для усилительной ПНГЭ — подвижный шлиф, обязанности которого уплотнительные. Он скользит по наружным поверхностям в соответствующих каналах контейнера. Передняя часть

его — тонкостенная коническая втулка, под давлением она деформируется, сжимая проходящую через нее непрерывную заготовку.

«Рабочая обстановка» в контейнере создается жидкостью от отдельного источника высокого давления. Она попадает в рабочую камеру контейнера в сжатом виде и через отверстие в хвостовике шлифа поступает в кольцевую полость, образованную задней частью шлифа и контейнером. Варьируя размеры площадей заднего и переднего торцов, можно получить добавочное усилие.

После того как давление в контейнере достигнет величины, необходимой для выдавливания, заготовку в рабочей зоне контейнера выпрессовывают. Перемещающийся под действием осевого давления шлиф компенсирует уменьшение длины заготовки.

Следует отметить, что шлифовое уплотнение было разработано академиком Л. Ф. Верещагиным.

Принципиальный недостаток любого устройства ПНГЭ — прерывистость процесса, т. е. необходимость циклично повышать давление до максимальной величины и затем также снижать его до атмосферного. Материал экструдировается отдельными небольшими порциями, от этого механические свойства неодинаковы, так же как и сечения по длине проволоки. Цикличность же потребовала усложнения автоматической аппаратуры управления. Кроме того, полунепрерывную гидроэкструзию невозможно реализовать без сложных фиксирующих устройств, которые предотвращают выдавливание заготовки через входные уплотнения. Наконец, производительность полунепрерывных установок низка, так как существенная часть рабочего цикла приходится на обратный холостой ход плунжера.

**Непрерывная гидроэкструзия с применением высоковязкой жидкости.** В мае 1970 г. фирма «Вестерн электрик» поместила одновременно во многих технических журналах и даже в газетах сенсационное сообщение: «Создан процесс экструзии проволоки, который может прийти на смену волочению... Производство проволоки находится на грани революционной перестройки всей технологии... Исследователи фирмы создали непрерывный процесс гидроэкструзии... Капиталовложения в оборудование для производства проволоки могут быть снижены на 65%. Переход к непрерывной гидроэкструзии может стать основой проволоочной индустрии будущего».

В установке НГЭ фирмы «Вестерн электрик» высоковязкая жидкость (горячий пчелиный воск при температуре 423 К и давлении 183 МПа или жидкое стекло вязкостью  $5 \cdot 10^5$  сСт с тонкодисперсным наполнителем, порошком полиэтилена, что повышает вязкость до  $3 \cdot 10^6$  сСт) прокачивается через контейнер в направлении матрицы. Под давлением жидкость затвердевает, «прихватывается» к проволоочной заготовке и увлекает ее за собой. При вязкости  $3 \cdot 10^6$  сСт осевое сжимающее напряжение в заготовке 275 МПа. Необходимое для выдавливания сжимающее напряжение создается перемещением высоковязкой жидкости через большое число трубчатых секций в теле контейнера (в контейнере экспериментальной установки было размещено 40 секций длиной по 63,5 мм каждая). Локализованный электроподогрев разжижает прилегающий к стенкам контейнера тонкий слой высоковязкой жидкости, что существенно уменьшает трение. К матрице под высоким давлением подается другая жидкость — смазочная, под ее воздействием, собственно, и происходит пластическая деформация. Смазочная жидкость во время выдавливания выходит из контейнера тонкой струей вместе с экструдированной проволокой.

(Следует отметить, что впервые схема непрерывной гидроэкструзии была предложена советским изобретателем Е. А. Шварцбурдом в 1965 г.).

Установка НГЭ «Вестерн электрик» не избавлена от существенных недостатков. Так, применена весьма дорогостоящая высоковязкая жидкость — пчелиный воск. Две автономные гидросистемы высокого давления — смазки и высоковязкой жидкости — усложняют установку, тем более что фирма подчеркивает необходимость тонкого автоматического регулирования расхода как смазочной, так и высоковязкой жидкости в зависимости от скорости экструзии, а также температуры высоковязкой жидкости в зависимости от расхода жидкости и скорости экструзии. Очень сложен по конструкции и в изготовлении контейнер высокого давления с большим количеством внутренних каналов.

В общем, говорить о «революционной перестройке технологии» пока еще преждевременно.

**Непрерывная гидроэкструзия с «заталкиванием» заготовки.** Суть способа в том, что заготовку в контейнер

подают с постоянной скоростью под действием осевого усилия. Его создают механическими или электромагнитными (для ферромагнитных материалов) устройствами, расположенными вне контейнера со стороны ввода заготовки. Вводить заготовку в уплотненный контейнер можно, например, с помощью приводных роликов. Они прижимаются к ней и сообщают усилие, необходимое для преодоления сопротивления уплотнений высокого давления на входе контейнера, а также сил обратного выдавливания заготовки жидкостью высокого давления.

Прутковая, или проволоочная, заготовка 1 (рис. 7) под действием приводных роликов 2, прижимающихся с помощью пружин 3 с определенным усилием к поверхности заготовки, заталкивается в контейнер высокого давления 4 через калибрующую волоку 5 и входной уплотнительный узел 6. Жидкость высокого давления от внешнего источника поступает в контейнер через отверстие 7 в его корпусе. Под действием высокого давления жидкости в полости 8 и усилия, прикладываемого приводными роликами, заготовка выпрессовывается через матрицу 9 и поступает в сматывающее устройство.

Прутки конечной длины могут стыковаться между собой в ходе процесса сваркой за пределами роликов. Возможна также гидроэкструзия несоединенных в одно целое заготовок в том случае, если усилие подачи обеспечит непрерывное взаимодействие их торцов.

Гидроэкструзия осуществляется выдавливанием: жидкость создает осевое усилие, сматывающее устройство — тяговое. Последнее обстоятельство позволяет снизить рабочее давление в контейнере на величину порядка 0,8—0,85 от предела текучести материала.

Устройство может работать как от прессового мультипликатора, так и от гидрокомпрессора высокого давления. То, что усилие «заталкивания» превышает усилие обратного выдавливания заготовки, позволяет работать в режиме усилительной гидроэкструзии — гидропрессования с дополнительным осевым усилием заталкивания. В этом случае давление, необходимое для гидроэкструзии, уменьшается на величину напряжения, создаваемого в материале избыточным заталкивающим усилием. Кроме того, его можно дополнительно снизить благодаря усилию натяжения, с которым на отпрессованную часть материала воздействует сматывающее устройство.

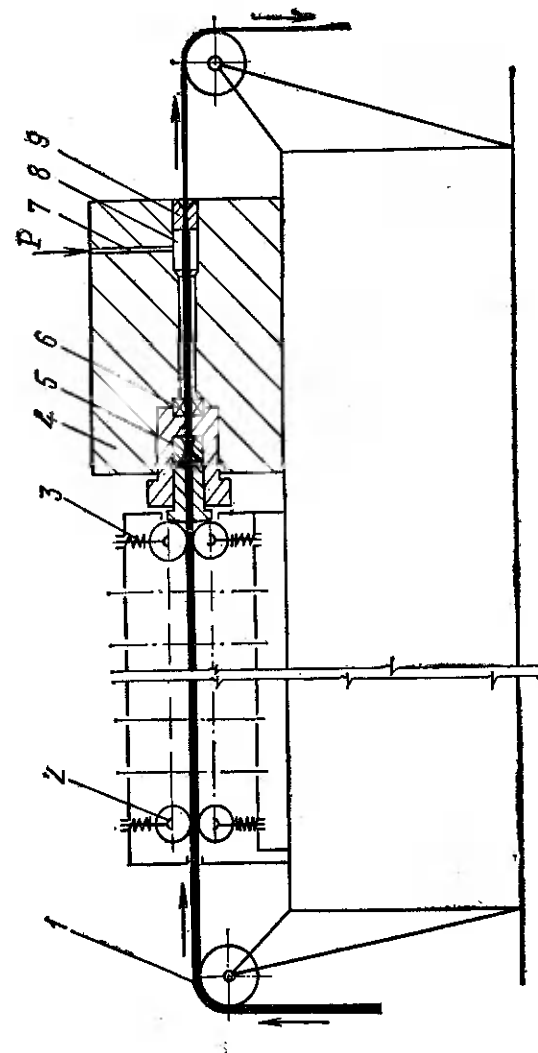


Рис. 7. Схема непрерывной гидроэкструзии



Надежной работы уплотнений высокого давления на входе в контейнер можно добиться с помощью калибрующей матрицы и дросселирующего канала; они создают отрицательный градиент давления рабочей жидкости. Жидкость высокого давления подается непосредственно в рабочую полость контейнера: достоинство здесь то, что при этом прочность контейнера «выше».

Но так как объем контейнера высокого давления велик, производительность источника жидкости высокого давления также невысока.

**Пластическая деформация соединяет металлы.** Как уже указывалось, для полного сращивания двух металлических поверхностей необходимо либо высокое давление, при котором металл в областях контакта будет пластически деформироваться, либо такой нагрев, который увеличивает активность и подвижность атомов кристаллической решетки при одновременном воздействии и некоторого давления.

Ученые установили, что в местах контактов двух металлических поверхностей действие межатомных сил притяжения начинается на расстояниях  $4-5 \cdot 10^8$  см. Поскольку даже при обработке с наивысшей точностью остаются неровности высотой  $0,3-1,0$  мкм, ясно, что действие малого давления без существенной пластической деформации не приведет к сращиванию, разве что только в отдельных микровыступах. Впервые осуществил успешное сращивание — холодную сварку металлических изделий — советский ученый К. К. Хренов. В дальнейшем процесс стали применять в электротехническом производстве, где в настоящее время подавляющее большинство шинных контактов изготавливают способом холодной сварки.

Как показал К. К. Хренов, главнейшее условие молекулярного сращивания металлических поверхностей — абсолютно чистые кристаллические границы. Этого можно добиться, если при сдавливании, например, металлических стержней, зажатых в губки, весь объем металла выдавливается в виде грата. Сильнейшая пластическая деформация обеспечивает на срок, измеряемый сотнями долями секунды, сближение друг с другом кристаллитов, расположенных глубинных зон металла. А первоначально контактировавшие загрязненные и окисленные поверхности полностью удаляются. Выдавленный в виде грата металл становится как бы защитной зоной для тех

слоев металла, сближенных до расстояния, на котором мгновенно создается стабильная металлическая связь и образуется единая кристаллическая структура.

Нужно отметить, что в процессе пластической деформации выдавливаемый металл не только защищает глубинные слои, но и создает нагрев поверхностных слоев контактирующих зерен. Мгновенные значения температуры микробоъемов металла, образующих зону сращивания, измерить до сего времени не удалось, но, бесспорно, она может приближаться к точке плавления.

Способом холодной сварки можно соединять изделия не только встык, но и внахлестку. Листовые детали зажимаются между полыми стальными стаканами (в дальнейшем эти стаканы остаются неподвижными). Находящиеся в полых стаканах пуансоны глубоко внедряются в детали, а стаканы предотвращают выпучивание металла. Из-под пуансонов он течет во все стороны, разрушая окисные пленки на соединяемых поверхностях и создавая контакт между чистыми кристаллитами.

При холодной сварке внахлестку необходимо прикладывать давления, значительно превышающие предел текучести соединяемых металлов.

Холодная сварка шинных контактов алюминия с медью ограничивается температурой  $350$  К. При длительном более высоком нагреве в контакте алюминий — медь усиливаются процессы диффузии и электропереноса, возникают хрупкие интерметаллические соединения, которые в конечном счете разрушают контактную поверхность.

Несмотря на этот недостаток, с каждым годом сварку под высоким давлением используют все чаще. Способ позволяет получить прочные и надежные соединения из алюминия, меди, цинка, никеля, свинца, серебра, золота и других пластичных металлов, сварка которых другими способами затруднительна. Холодной сваркой можно соединять разнородные металлы. У нее низкая энергоемкость, высокая производительность, она легко поддается автоматизации, гигиенична. В СССР оборудование для холодной сварки выпускается в широком ассортименте. Например, серия машин МСХС для сварки встык с максимальным усилием осадки  $5-8-20-30-35-80-120$  Тс для сечения свариваемых деталей из меди, алюминия и алюминиево-медных сечением от  $2$  до  $1000$  мм<sup>2</sup> и точечной сварки УГХС и МХСА с макси-

мальным усилием 5—50—120 Тс для соединения алюминисвых листов толщиной 5 мм, армирования деталей с размерами участка до 60×60 мм и для армирования алюминиевых обмоток медными накладками с размерами участка 120×120 мм.

\* \* \*

Читатель, по-видимому, убедился, сколь широк диапазон технологических приложений высокого давления, хотя в небольшой книжке все описать невозможно.

Энергия жидкости, как показал еще Даниил Бернулли, проявляется в трех видах: положения (геодезический напор), давления (пьезометрический напор) и кинетики (скоростной или гидродинамический напор). Это позволяет создавать высокое давление самыми разнообразными способами. Например, вытекающая из насадки струя при встрече с твердой преградой активно давит на нее. Давление струи равно произведению плотности жидкости на квадрат скорости истечения. Нетрудно подсчитать, что давление водяной струи, необходимое для резания твердой стали с прочностью 700 МПа, соответствует скорости истечения 838 м/с. Много это или мало? Для справки скорость вылета пули из противотанкового ружья Дегтярева — 1012 м/с.

Мы уже упоминали, что физика высоких давлений предлагает еще один весьма оригинальный и перспективный метод создания сверхвысокого гидростатического давления — использование энергии полиморфных превращений при скачкообразном уменьшении объема некоторых веществ под давлением. Даже такое довольно экзотическое явление, как затвердевание или «замерзание» жидкости под давлением, можно использовать для упрочнения металлов и сплавов.

Внедрение в промышленности новых способов измельчения, прессования и холодной обработки широкой гаммы материалов с использованием высокого давления приведет не только к резкому повышению производительности труда, но и к экономии сотен тысяч тонн металла, уходящего в стружку, миллионов киловатт-часов электроэнергии, удлинению сроков службы деталей. Можно предполагать, что ПФВГД в ближайшем будущем станет наиболее распространенным методом металлообработки.

Трудности практической реализации идей и методов физики высоких давлений в том, чтобы, образно выражаясь, перехитрить природу. Ведь даже сравнительно небольшое (разумеется, с точки зрения физиков) давление в 3000 МПа выше предела прочности лучших марок закаленных высоколегированных сталей. А уплотнения? Как удержать жидкость под давлением свыше 1000 МПа, когда ее проницаемость увеличивается на три порядка и вода, например, проникает в считающиеся совершенно непроницаемыми материалы, скажем, в толщу стекла?

Поэтому прогресс физики высоких давлений и ее многочисленных технологических приложений определяется сегодня не новыми теориями, а скромными на первый взгляд изобретениями новых конструкций контейнеров, уплотнений, плунжеров и других не менее прозаичных деталей.

## Литература

Попова С. В., Бенделиани Н. А. Высокие давления. М., «Наука», 1974.

Колпашников А. И., Вялов В. А. Гидропрессование металлов. М., «Металлургия», 1973.

Прозоров Л. В., Костава А. А., Ревтов В. Д. Прессование металлов жидкостью высокого давления. М., «Машиностроение», 1972.

Шиняев А. Я. Фазовые превращения и свойства сплавов при высоком давлении. М., «Наука», 1973.

Пью Х. Л. Механические свойства материалов под высоким давлением. М., «Мир», 1973.

Научные труды Московского института стали и сплавов. 1976, № 98.

Белоцерковский А. М., Титарев Н. Я. Скоростное безвакуумное спекание изделий из порошков титана и сплавов на его основе. — «Цветные металлы», 1974, № 12.

## СОДЕРЖАНИЕ

Тонкое измельчение . . . . .	3
Формование и прессование . . . . .	16
Пропитка . . . . .	23
Упрочнение . . . . .	28
Пластическое формоизменение . . . . .	35
Литература . . . . .	59

Артем Маркович БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ  
ВЫСОКИЕ ДАВЛЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ

Гл. отраслевой редактор В. П. Демьянов  
Редактор Г. И. Флиорент  
Мл. редактор Н. А. Львова  
Худож. редактор Т. И. Добровольнова  
Обложка художника Л. П. Ромасенко  
Техн. редактор Т. В. Самсонова  
Корректор В. В. Каночкина

Т-10591. Индекс заказа 75008. Сдано в набор 10/VI-77 г. Подписано к печати 9/VI-77 г. Формат бумаги 84×108/32. Бумага типографская № 3. Бум. л. 1. Печ. л. 2. Усл. печ. л. 3,36. Уч.-изд. л. 3,18. Тираж 60 990 экз. Издательство «Знание». 101835, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Заказ 1095. Типография Всесоюзного общества «Знание», Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.  
Цена 11 коп.

Всем, кто хочет знать  
о проблемах современной генетики,  
биофизики, биохимии, о законах  
поведения зверей и птиц, о борьбе  
растений с заболеваниями, о тайнах  
секреторных и рецепторных клеток,  
о различных видах сигнализации  
у животных

Всем, кто не хочет замыкаться  
в узких рамках своей специальности

Всем, кто хочет использовать  
в повседневной жизни и в работе  
открытия современных ученых-биологов,  
издательство «Знание» предлагает  
подписную серию брошюр  
«БИОЛОГИЯ»

В серии выходит в год 12 брошюр. Авторы — крупнейшие ученые страны.

В свободную продажу — в книжные магазины — брошюры серии поступают в ограниченном количестве. Советуем своевременно оформить подписку. Подписаться можно в любом отделении связи на квартал, полгода,

год. Подписная цена соответственно — 33 к., 66 к., 1 р.  
32 к. Индекс серии в каталоге «Союзпечати» 70071.

В 1977 г. подписчики серии прочтут:

Брушлинский А. В., кандидат биологических наук

#### СООТНОШЕНИЕ БИОЛОГИЧЕСКОГО И СОЦИАЛЬНОГО В РАЗВИТИИ ЧЕЛОВЕКА.

В брошюре рассматриваются современное состояние и некоторые пути решения очень сложной и во многом дискуссионной проблемы «Биологическое и социальное в психике человека». Марксистско-ленинский метод анализа этой проблемы противопоставлен идеалистическим и вульгарно-материалистическим подходам к ней. Особое внимание уделено главному и наиболее дискуссионному вопросу — о роли задатков в психическом развитии человека. Автор предлагает отчасти новую трактовку соотношения психического и физиологического в задатках. Интерес представляет также раскрытие предмета исторической и социальной психологии.

Волькенштейн М. В., член-корреспондент АН СССР  
О СОВРЕМЕННОЙ БИОФИЗИКЕ

В последние годы в результате огромного размаха исследований по биологии, физике и химии, возникновения мощной приборостроительной промышленности происходит бурное развитие биофизики.

Автор расскажет о специфике задачи исследования в физике и биологии — причинное толкование в физике и финалистическое (исходящее из понятия цели) в биологии, рассмотрит эволюцию в биологии и в термодинамике, физику добиологической и биологической эволюции, а также такие частные проблемы, как мембранный транспорт, распространение нервного возбуждения, мышечные сокращения, фотобиологические явления, электронно-конформационные взаимодействия и др.

Дубинин Н. П., академик

Пашин Ю. В., кандидат медицинских наук

#### МУТАГЕНЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

В брошюре приводятся материалы о загрязнении окружающей среды факторами различной природы, в том числе мутагенами, рассказывается о влиянии их на здоровье человека, популяций растений и животных.

Обсуждаются вопросы корреляции между мутагенной и канцерогенной активностями ряда соединений, методы выявления мутагенов и канцерогенов, а также проблемы защиты человека и природных популяций от загрязнения окружающей среды.

Камшилов М. М., доктор биологических наук  
НООГЕНЕЗ — ЭВОЛЮЦИЯ УПРАВЛЯЕМАЯ ЧЕЛОВЕКОМ

Сознательное управление эволюцией биосферы — одна из актуальных теоретических задач сегодняшнего дня. Становится все более очевидным, что назревающее противоречие между человеком и природой может быть разрешено не путем возврата к полудикому состоянию или заменой биосферы своеобразной техносферой, а в результате ноогенеза, т. е. сознательного управления биосферой с помощью более совершенной техники в условиях социализма.

Автор рассматривает вопросы происхождения, эволюции и организации биосферы, историю взаимоотношений человеческого общества и биосферы, так называемый экологический кризис и пути его преодоления, взаимоотношения биогенеза и ноогенеза.

Рубин Б. А., член-корреспондент ВАСХНИЛ  
РАСТЕНИЯ В БОРЬБЕ С ЗАБОЛЕВАНИЯМИ

Брошюра посвящена актуальной биологической проблеме, имеющей большое общетеоретическое и народнохозяйственное значение. Вопрос о природе растительного иммунитета на протяжении многих лет привлекает к себе внимание ученых. Это не удивительно, ибо болезни растений наносят огромный ущерб сельскому хозяйству, снижая урожай и качество продукции.

Автор излагает современные представления об эволюции физиолого-биохимических свойств паразитных микроорганизмов, природе их влияния на растение-хозяин, а также о защитных реакциях, используемых им в борьбе с возбудителем болезни. Основу развиваемых взглядов составляют результаты многолетних экспериментальных работ автора и его школы в МГУ.

Слепян Э. И., доктор биологических наук  
ПАТОЛОГИЧЕСКИЕ НОВООБРАЗОВАНИЯ У РАСТЕНИЙ

Исследования по проблеме патологических новообразований (онкологии и тератологии) растений имеют важное значение для многих областей науки, народного хозяйства и медицины. Изучение патологических новообразований у растений открывает возможности повышения продуктивности посевов и насаждений, плодородия земель, эффективности лесоводства, увеличения сборов лекарственного сырья и даже улучшения поисков полезных ископаемых.

Автор рассмотрит сущность проблемы, смысл изучения опухолей и уродств растений и содержание основных аспектов их исследования, возникших в связи с практикой селекции растений, растениеводства, лесоводства, защиты растений от вредителей и болезней.

Студитский А. Н., доктор биологических наук  
ИЗМЕЛЬЧЕННАЯ МЫШЦА (ЗАГАДКИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ)

В брошюре приводятся многочисленные факты и разработанные

на их основе гипотезы, относящиеся к механизмам формообразования, присущим всем типам организации жизни. Значительное место отводится открытому автором феномену вторичного формообразования мышечных органов из измельченной мышечной ткани.

#### **Сборник**

### **ГЕНЕТИЧЕСКАЯ ИНЖЕНЕРИЯ (РЕАЛЬНОСТЬ, ПЕРСПЕКТИВЫ И ОПАСЕНИЯ)**

Авторы знакомят читателя с достижениями новой отрасли современной биологии — генетической (или геной) инженерии, развитие которой открывает перспективы более эффективного решения некоторых практических вопросов медицины и сельского хозяйства.

Будет рассказано о возможных путях создания с помощью лабораторной техники организмов (микробов, растений и животных) с новыми свойствами, измененными в желательную для исследователя сторону, а также о социально-политических аспектах этих экспериментов и проблемы этики научного исследования.

**ПОДПИСНАЯ ЦЕНА НА ГОД — 1 руб. 32 коп.**

**ИНДЕКС СЕРИИ В КАТАЛОГЕ «СОЮЗПЕЧАТИ» — 70071**