

ВЕСТНИК ИНЖЕНЕРОВ и ТЕХНИКОВ

1 9  4 7

ИЗДАТЕЛЬСТВО ВЦСПС — ПРОФИЗДАТ
МОСКВА

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Действительный член Академии наук СССР Н. Н. Давиденков—За и против единой теории прочности	121
Д-р техн. наук, проф. В. И. Лайнер—К вопросу о рациональном методе получения блестящих гальванических покрытий	130
Инж. Г. К. Швыряев—Пористое хромирование	135
Канд. техн. наук А. В. Нетушил—Сушка дерева токами высокой частоты	141
Проф. В. Д. Мачинский—Простейшие теплотехнические расчеты для размораживания грунтов при зимних работах	149
Инж. Н. В. Булгаков—Новый способ определения давления грунта на подпорную стенку	153
Хроника научных инженерно-технических обществ	
В Обществе сельского хозяйства	157
В Обществе текстильщиков	158
Критика и библиография	159

Редакционная коллегия: проф. В. С. ЕМЕЛЬЯНОВ, инж. В. П. ЛЕБЕДЕВ, акад. В. Л. ПОЗДЮНИН, член-корр. АН СССР Н. С. СТРЕЛЕЦКИЙ, член-корр. АН СССР А. Б. ЧЕРНЫШЕВ.

А Д Р Е С Р Е Д А К Ц И И: Москва, Проезд Владимира, 6. Тел. К 4-88-65

В Е С Т Н И К И Н Ж Е Н Е Р О В Т Е Х Н И К О В

« ENGINEERS AND TECHNICIANS BULLETIN »

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОРГАН ВСНТО

« BULLETIN DES INGENIEURS ET DES TECHNICIENS »

ОСНОВАН В 1915 г. ПОЛИТЕХНИЧЕСКИМ ОБЩЕСТВОМ в МОСКВЕ и ОБЩЕСТВОМ ТЕХНОЛОГОВ в ЛЕНИНГРАДЕ

№ 4 1947 г.

Апрель

За и против единой теории прочности

Действительный член Академии наук СССР Н. Н. ДАВИДЕНКОВ

(Член Общества машиностроителей)

возможна ли «единая теория прочности»? Чтобы ответить на этот вопрос, надо сначала уточнить самое понятие единой теории прочности, установив его содержание и объем.

Теорию прочности можно понимать различно. Говорят, например, о физической теории, которая должна связать прочность вещества с межатомными силами. К сожалению, существующие сейчас многочисленные физические теории прочности весьма далеки от сколько-нибудь удовлетворительного решения этой задачи.

Мы будем здесь говорить об «инженерной» теории прочности, которая формулируется так: зная условия разрушения материала при некоторых простейших — преимущественно одноосных — видах напряженного состояния, установить критерии разрушения при любом виде сложного напряженного состояния. В этом плане строились и все ранее предлагавшиеся теории. Однако каждая из них выдвигала свой собственный претендовавший на универсальность критерий (наибольшее напряжение, либо наибольшую деформацию, либо энергию изменения формы и т. п.) и притом один и тот же для разных видов потери материалом его служебных качеств: в одних случаях имелось в виду только появление пластических деформаций, в других — полное разрушение, независимо от хрупкого и вязкого состояния материала. Единая теория прочности должна предусматривать одну систему критериев, охватывающих собой все возможные случаи разрушения.

Будет ли подобная теория настолько универсальной, чтобы охватывать все технические материалы без всякого различия их природы? А priori можно сказать, что такой широкий объем понятия этой теории едва ли осуществим. В самом деле, физическая природа механизма разрушения разных материалов весьма различна. Так, например, хрупкое разрушение от простого одноосного растяжения в металлических кристаллах происходит в результате нарушения связи по их плоскостям спайности после появления первой ничтожной пластической деформации. В разрушении же стекла, носящем тоже хрупкий характер, как показали новейшие исследования Престона, принимает глубокое уча-

стие физико-химическое воздействие окружающей газовой среды и заключающихся в ней водяных паров (что создает большую чувствительность прочности ко времени нагружения). У металлических сплавов, находящихся в метастабильном состоянии (низкий отпуск, пересыщенный твердый раствор), в процессе деформирования, предшествующем разрушению, могут происходить фазовые превращения, связанные с видом напряженного состояния и влияющие на прочность, которые также не могут быть предусмотрены общей теорией.

Совершенно очевидно, что круг материалов для этой теории должен быть чем-то ограничен. Как нам кажется, разумно было бы говорить о единой теории прочности прежде всего в отношении металлических сплавов, находящихся в стабильном состоянии, или, в лучшем случае таких материалов, в деформации и разрушении которых не принимают участия физико-химические процессы. Лишь после создания ясной теории для таких материалов можно, в порядке ее дальнейшего развития, делать к ней надстройки, приурочиваемые к специальным свойствам материалов.

Спрашивается теперь, можно ли хотя бы в этих суженных рамках дать удовлетворяющую фактам теорию?

На позиции полного отрицания возможности существования всякой теории прочности стоит Мак-Адам (1). На конференции по прочности, состоявшейся в 1943 г. в Чикаго, он заявил: «Понятие технического сцепления (по Кунце) содержит бесконечное число значений, каждое из которых относится к частному значению тензора напряжений» — а это означает отказ от всяких обобщений.

На той же конференции Бриджмен (2), усиленно работающий последние годы над вопросами прочности, сказал: «Я весьма скептически отношусь к возможности существования чистого критерия разрушения». Большинство работ Бриджмена, связанных с вопросами прочности, приводит его к этому убеждению.

Как известно, большая часть опытов проводится Бриджменом при чрезвычайно высоких гидростатических давлениях, и, таким образом, условия эксперимента выходят далеко за пределы нашей

обычной практики. Этот расширенный диапазон обстановки выявляет особенности, ускользающие от внимания экспериментаторов при обычных условиях, и подчеркивает неприемлемость тех примитивных представлений о прочности, которые возникают у нас на основании более простых испытаний. В дальнейшем мы остановимся на некоторых парадоксах, выдвигаемых Бриджменом, и покажем, что многие из них легко объяснимы и в рамках простейшей теории. Впрочем, заметим здесь, что, желая построить практически приемлемую универсальную теорию прочности, мы вполне могли бы удовольствоваться пригодностью ее хотя бы в более простых условиях, в которых обычно работают наши технические материалы. Если бы эта теория оказалась недостаточной для объяснения всех явлений, происходящих в условиях работы Бриджмена, то на это можно было бы смотреть лишь как на ограничение области применения теории, но не как на ее отрицание. Так, механика Ньютона не теряет своего значения рядом с механикой Эйнштейна, а является только ее частным случаем.

Как известно, первая попытка дать единую теорию прочности материалов принадлежит Я. Б. Фридману (3). В основу этой теории, графически выраженной в известной диаграмме механического состояния, кладутся следующие положения:

1. Существует два вида разрушения: срез от касательных напряжений и отрыв — от нормальных напряжений и соответственно две различные характеристики прочности: сопротивление срезу и сопротивление отрыву.

2. Вязкое разрушение, наступающее после пластической деформации, большей частью происходит от среза; в том числе разрушение растягиваемого на испытательной машине образца, которому предшествует образование шейки, также приписывается полностью касательным, а не нормальным напряжениям, как это обычно делалось ранее (по крайней мере, по отношению к дну чашечки разрыва); в этом заключается, может быть, наиболее революционное положение теории.

3. Хрупкое разрушение, в согласии со второй теорией прочности, вызывается не напряжениями, а деформациями удлинения, или, что то же, условными приведенными напряжениями (попытка Я. Б. Фридмана приписать приведенным напряжениям реальное существование не является неотъемлемой частью теории и мы на ней останавливаться не будем); это положение объясняет и хрупкое разрушение при сжатии.

4. При заданной диаграмме деформации величина сопротивления срезу определяет собой и пластичность (предельную деформацию), являющуюся, таким образом, производной константой вторичного порядка.

Разберем по порядку эти основные положения и посмотрим, можно ли принять их безоговорочно, или они требуют каких-нибудь поправок. Особенно значение придадим выдвигаемым или могущим быть выдвинутыми возражениям¹.

1. Существование двух видов разрушения — отрыва и среза, в свое время убедительно показанное мною при объяснении известных опытов Люрсена

и Грина с ударным кручением закаленной стали, находит дополнительное подтверждение в полученной недавно С. И. Ратнер (4) диаграмме кручения закаленной углеродистой стали (рис. 1). На диаграмме отчетливо устанавливается граница между разрушением от касательных напряжений, дающим излом по плоскости, перпендикулярной к оси образца, и разрушением от нормальных напряжений, идущим по винтовой линии. При увеличении содержания углерода в стали выявляется граница (0,65% С), левее которой получаются изломы среза, а правее — отрыва. При этом сопротивление срезу с увеличением содержания углерода непрерывно возрастает, а сопротивление отрыву, наоборот, падает. При содержании углерода 0,90%, мы наблюдаем альтернативное существование обоих видов излома, причем прочность каждого из них укладывается на соответствующую кривую. Вообще, опыты с кручением лучше всего выявляют различие этих видов разрушения вследствие различного направления поверхностей излома.

То обстоятельство, что разрушения от среза и от отрыва являются характеристиками не самого материала как такового, а тех условий, при которых происходит его испытание, хорошо подтверждается недавно полученной автором совместно с С. Е. Беляевым диаграммой ударного кручения образцов из стали хромансиль при разных температурах отпуска. Опыты производились с двумя сериями образцов: в первой серии были гладкие цилиндрические стержни, во второй они имели небольшое отверстие, просверленное по одному из диаметров. При испытании первой серии имел место чистый сдвиг. При второй, наоборот, по контуру отверстия (ввиду отсутствия напряжения, направленного по радиусу отверстия) напряженное состояние оказывалось линейным. Кроме того, имела место концентрация напряжений (хотя и без объемного напряженного состояния). Для обеих серий отчетливо выявлялась та температура отпуска, при которой происходил переход от среза к отрыву: для первой серии 200°, для второй — 325° (рис. 2).

Как мы видим, переход от чистого сдвига к одноосному напряженному состоянию сопровождается повышением критической температуры. Это легко объясняется уменьшением роли касательных напряжений по сравнению с нормальными при переходе от сдвига к растяжению (а также может быть,

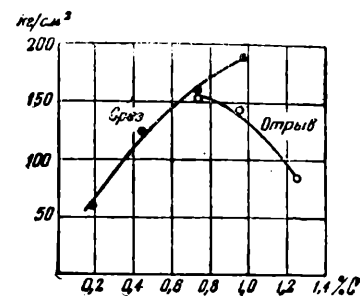


Рис. 1. Испытание углеродистой закаленной стали на кручение (С. Ратнер)

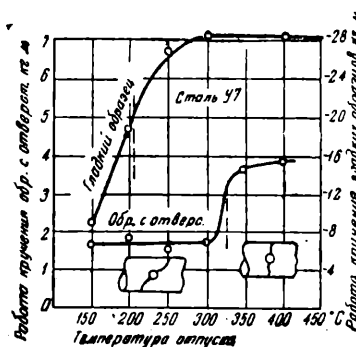


Рис. 2. Испытание на кручение стальных и просверленных образцов стали «хромансиль» при разных температурах отпуска (Н. Давиденков и С. Беляев)

¹ Мы здесь не будем касаться вопроса о «диаграмме механического состояния», требующего отдельного обсуждения.

повышением предела текучести вследствие концентрации напряжений).

Остановимся теперь на возражениях Бриджмена, приводящего примеры хрупкого разрушения при отсутствии растягивающих напряжений или деформаций удлинения, что как бы противоречит самому представлению о сопротивлении отрыву, как прочностной характеристике (5).

Одним из наиболее трудно объяснимых случаев разрушения является известный парадокс с эбонитовым кольцом. Это кольцо, вплотную надетое на стальной цилиндр, разрушается в то время как вся система подвергается высокому гидростатическому давлению, хотя ни в одной точке системы не возникает растягивающих напряжений или деформаций удлинения. Следовательно, мы имеем здесь хрупкое разрушение, несмотря на то, что все напряжения и деформации кольца оказываются только сжимающими. Объяснение этому может быть дано, если предположить, что разрушение вызвано в данном случае касательными напряжениями, появление которых является неизбежным следствием различия модулей упругости эбонита и стали. Вследствие этого, эбонитовое кольцо, стремясь уменьшить свой диаметр сильнее, чем стальной стержень, оказывается нагруженным по внутреннему контуру радиальными давлениями. В результате главные напряжения в кольце получаются не одинаковыми и порождают касательные напряжения. Здесь мы имеем случай среза без предшествующей пластической деформации (скол), что однако принципиально ни в какой степени не противоречит диаграмме механического состояния.

Напомним о следующих опытах Бриджмена, которые часто выдвигаются как не поддающиеся объяснению. Именно, образцы стали, к которым не приложено никакой растягивающей силы, могут быть разрушены путем одного только бокового давления. Если образцы сделаны из хрупкого материала, например стекла или закаленной стали, то разрушение их хорошо укладывается в теорию приведенных напряжений, так как они получают при этом удлинение вдоль оси. Если же материал вязкий, то боковое давление, несмотря на отсутствие осевого растяжения, создает касательные напряжения, одинаково направленные с теми, которые явились бы результатом осевого растяжения. Образец разрушается даже с образованием такой же шейки, как и при растяжении. При этом гидростатическое давление оказывается равным обычному пределу прочности материала, что легко объясняется равенством создаваемых в обоих случаях касательных напряжений. Кроме того, следует учесть, что само образование шейки создает растягивающие усилия, параллельные оси образца, за счет уменьшения поперечного сечения.

Третий парадокс Бриджмена состоит в следующем. Полый стальной цилиндр подвергался всестороннему наружному давлению и выдерживал его не разрушаясь. После удаления, однако, с внутренней стороны цилиндра появлялась трещина, которая постепенно, в течение нескольких дней, продолжала расти и, наконец, приводила его к полному разрушению. Бриджмен готов объяснить этот процесс действием остаточных напряжений, но усматривает непонятную его сторону в том, что трещина, распространяясь от центра к периферии, постепенно

переходит из растянутых областей в сжатые, и тогда ее дальнейший рост становится необъяснимым.

Однако это рассуждение не учитывает того изменения в распределении напряжений, которое вызывается появлением трещины. Если предположить, что в поперечном сечении трубы сумма усилий все время остается равной нулю, то, очевидно по мере уменьшения этого сечения за счет трещины нейтральная ось перемещается все ближе и ближе к наружной поверхности, и вершина трещины всегда будет лежать в растянутой зоне.

2. Перейдем теперь к вопросу о сопротивлении срезу. Здесь будем различать два момента: во-первых, утверждение, что вязкое разрушение образца из пластического материала вообще вызывается касательными напряжениями; во-вторых, признание за величиной «сопротивления срезу» значения константы материала. Не повторяя всех выдвигаемых Фридманом доводов, напомним лишь один из них, кажущийся нам неопровержимым: это — повышение истинного предела прочности образцов (при вязком разрушении), снабжаемых круговым надрезом. Надрез сильно повышает радиальные напряжения в узком сечении образца (существующие в меньшей степени и в шейке) и тем вызывает увеличение осевых напряжений, требуемых для одной и той же величины касательных напряжений. Отсюда следует, что при постоянстве сопротивления срезу истинное сопротивление разрыву должно быть тем больше, чем глубже надрез. Это и наблюдается в действительности. Если бы разрыв происходил от нормальных напряжений (на дне чашечки), достигающих какой-то критической величины, то надрез не только не мог бы повысить прочность, но, наоборот, скорее понизил бы ее за счет неоднородности распределения напряжений в сечении.

Часто можно услышать такое мнение: трудно себе представить сам механизм разрушения от касательных напряжений. Забывая, что при кручении наблюдается срез по плоскостям, заведомо свободным от растягивающих напряжений, говорят о необходимости присутствия растягивающих напряжений для разрушения и подтверждают это тем фактом, что разрушить раздавливанием цилиндрический образец из такого пластического материала, как сталь или медь, не удастся. На это нужно ответить так: затруднение создается невозможностью обеспечить одноосное напряженное состояние при сжатии таких образцов. Действительно, большое поперечное расширение образца, принимающего бочкообразную форму, делает то, что, благодаря силам трения о захваты машины, в средней части образца создается напряженное состояние всестороннего сжатия, уменьшающее касательные напряжения. На поверхности же при далеко заведенном сжатии появляются косые трещины, вызванные касательными напряжениями.

Можно еще услышать такие возражения. Ведь касательные напряжения вызывают пластическую деформацию скольжения, причем по мере ее прохождения сопротивление деформированию все возрастает, и материал упрочняется. Спрашивается, как же может произойти разрушение от тех же самых напряжений без перехода сопротивления через максимум? Не следует ли предположить, что разрушение может наступить только в результате сужения шейки до нуля в силу чисто геометриче-

ского процесса — сползания скользящих друг по другу слоев?

На это можно возразить, что благодаря появлению в узком сечении ряда разрывов — трещин, вызванных радиальными напряжениями и хорошо видимых под микроскопом, утоняются до нуля отдельные кристаллы без отражения этого на общем сужении шейки.

При разрушении, вызванном кручением, процесс протекает аналогично. По свидетельству Якутовича, наблюдавшего картину разрушения под микроскопом (6), деформация сдвига происходит с образованием микропустот. Начиная с некоторого момента, эта деформация идет с понижением среднего значения касательных напряжений и локализуется в узкой зоне, которая все больше и больше разрыхляется. Из микропустот образуются макропустоты, сливающиеся в общую трещину. Разрушение сопровождается также сужением до нуля сечения микростолбиков, разделенных микропустотами.

Впрочем, говоря, в теории прочности, о разрушениях от среза, мы интересуемся лишь макрокопической механической картиной этого процесса. Как бы ни протекал процесс разрушения отдельных кристалликов, с точки зрения общего механического процесса мы сохраняем полное право говорить о разрушении от макрокопических касательных напряжений.

Объяснения механизма образования чашечки разрыва путем среза будет дано ниже.

Основное и наиболее спорное утверждение теории Фридмана заключается в признании за величиной «сопротивления срезу» значения константы материала, и на этом пути встречаются серьезные возражения, требующие внесения существенных коррективов в теорию. Когда мы имеем дело с основными видами напряженного состояния — растяжением, сжатием и кручением, и если материал при этом не обладает особенно большой пластичностью, разрываясь, например, с образованием очень небольшой шейки, постоянство величины сопротивления срезу, как показал Я. Б. Фридман, получается превосходным.

В случае плоского напряженного состояния дело обстоит также еще довольно благополучно. Недавно в США проведен ряд опытов с тонкостенными медными и стальными трубами, подверженными одновременно внутреннему гидростатическому давлению и продольному растяжению. При разных комбинациях этих двух факторов создавались различные соотношения между главными напряжениями. Опыты производились независимо друг от друга в разных лабораториях Дэвисом и Мак-Греггором, и дали несовпадающие результаты. У Дэвиса (7) касательные напряжения (как наибольшие, так и октаэдрические) изменялись довольно значительно. В таблице 1 для примера показаны два крайних случая разрыва — по образующей и по окружности — при одинаковом соотношении главных напряжений.

Такие результаты могли бы сильно разочаровать сторонников единой теории прочности. Однако в противовес мы имеем опыты Мак-Греггера и Коффина (8), которые применяли более точный способ измерения деформации, нанеся на поверхность труб координатную сетку и измеряя с ее помощью с большой точностью местную деформацию. Для контроля проверялось равенство нулю суммы трех

Таблица 1

Отношение тангенциального напряжения к осевому	Касательные напряжения, кг/мм ²		Углы сдвига		Радиальные напряжения, кг/мм ²	Радиальные деформации
	наибольшие	октаэдрические	наибольшие	октаэдрические		
0,5	39	32,0	1,01	0,830	-1,8	-0,511
2,0	29	21,5	0,26	0,175	-3,2	-0,139

главных деформаций. Для отожженной стали SA/E-1020 были получены следующие числа (табл. 2).

Таблица 2

Отношение тангенциального напряжения к осевому	0	0,53	1,04	2,11	2,46	3,19
$t_{\max}$, кг/мм ²	34	33	34,5	31	33	32,5
$g_{\max}$	1,07	0,95	1,14	0,87	0,72	0,81
$t_{\text{окт}}$, кг/мм ²	32	27	32	25	26	26
$g_{\text{окт}}$	0,98	0,78	0,95	0,72	0,59	0,67

Как видим, наибольшие касательные напряжения при разрушении не отличались друг от друга больше, чем на 3 кг/мм², а октаэдрические дали разбег в 7 кг/мм². Таким образом, можно считать, что постоянство сопротивления срезу здесь подтверждается с достаточной точностью. Кстаи, эти же опыты показывают, что лучшей мерой предельного сопротивления срезу является наибольшее касательное напряжение по сравнению с октаэдрическим, также говорящее в пользу положений Фридмана.

Однако так обстоит дело лишь до тех пор, пока имеет место плоское напряженное состояние. Как только мы переходим к объемному состоянию, картина меняется и влияние нормальных напряжений выступает с полной очевидностью.

В необходимости учесть это влияние убеждают нас известные опыты Зибеля и Майера (9), произведенные еще в 1933 г. Образцы из стали и меди были растянуты при всестороннем давлении в 2 500 ат и из алюминия — в 1 200 ат. Оказалось, что в то время как сопротивление деформированию, выражаемое диаграммой растяжения, не чувствует влияния этого давления, сопротивление растяжению, наоборот, сильно возрастает. Увеличивается и пластичность. Шейка получается более узкой, а ободок скола — более широким.

Бриджмен провел эти опыты еще гораздо дальше, доведя давление до 30 000 ат (10). Была исследована целая серия различных видов стали — высокоуглеродистая с различным отпуском, хромистая, нержавеющая сталь 18-8 и др. Результаты испытания были обработаны на основе представлений о том, что в шейке растягиваемого образца напряженное состояние складывается из следующих трех элементов: а) эффективного напряжения F (Flow-Stress), постоянного по всему сечению и собственно обуславливающего пластическую деформацию ($F = 2t$); б) гидростатического всестороннего растяжения HT (Hydrostatical tension), равного нулю на поверхности и достигающего максимума в середине, и

в) наружного гидростатического давления P . При этом расчет напряженного состояния в шейке проводился Бриджменом по специально выведенной им формуле, не свободной от возражений (11).

По мере повышения давления, пластичность при разрушении непрерывно возрастает, причем зона сечения, занятая дном чашечки, становится все меньше и при давлениях от 10 000 до 17 000 ат полностью исчезает (рис. 3).

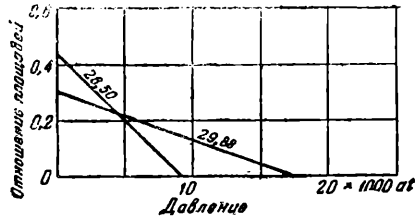


Рис. 3. Отношение площади дна чашечки разрыва при растяжении к общей площади сечения в шейке для четырех сортов нержавеющей стали, обозначенных номерами: 26,50 (Cr 12—17%, Ni 0,4%), 29,88 (Cr 18%, Ni 9—10%) (Бриджмен)

Результаты механического анализа представлены Бриджменом в виде ряда диаграмм, одна из которых приведена на рис. 4. С точки зрения теории Фридмана следовало ожидать, что величина F для всех давлений P окажется постоянной. Между тем, на всех диаграммах она непрерывно возрастает. Вместе с увеличением пластичности, о котором уже говорилось, это указывает на повышение сопротивления срезу, создаваемое объемными напряжениями, что не укладывается в «единую теорию» в ее первоначальном виде.

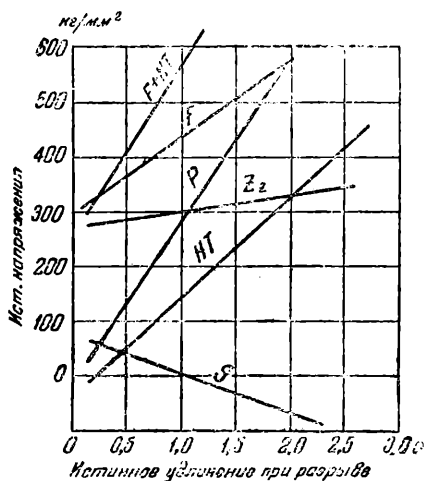


Рис. 4. Испытание на разрыв при всестороннем сжатии высокоуглеродистой стали, отпущенной при охлаждении на твердость 60 по Роквеллу

К сожалению, на диаграммах не удастся найти ни одного критерия, который бы сохранял постоянство при всех давлениях. Бриджмен безуспешно пытался проверить это постоянство для следующих величин:

- $F + HT$ — эффективного растягивающего напряжения по оси образца;
- $F + HT - P = Z$ — полного нормального растягивающего напряжения по оси образца;
- $S = \frac{1}{2}(F + HT - P)$ — среднего гидростати-

ческого растяжения (октаэдрического нормального напряжения по оси образца).

Если считать, что прочность определяется касательным напряжением в середине образца (где начинается разрыв), которое увеличено за счет гидростатического сжатия и уменьшено за счет гидростатического растяжения в одном и том же отношении α , то можно ожидать соблюдения следующего условия:

$$F = F_0 + \alpha (P - HT),$$

или величина

$$F_0 = F - \alpha (P - HT).$$

где $\alpha < 1$, должна быть постоянной.

Диаграммы Бриджмена не дают и в этой формуле для α разумной величины. Однако здесь надо учесть, что самый расчет HT сделан Бриджменом по теоретической, не проверенной формуле, дающей по сравнению с формулой Зибеля преувеличенные значения. К сожалению, в статье не приводятся подробные исходных данных, а потому пересчет по другим формулам невозможен. Кроме того, можно думать, что в предлагаемой нами формуле величина HT должна подставляться не для осевого волокна, а как средняя для площади начального разрыва (а при отсутствии дна у чашечки — и для всего сечения). Это также должно поправить дело, уменьшив HT .

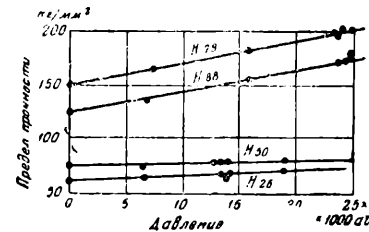


Рис. 5. Изменение предела прочности стали при всестороннем давлении для четырех сортов нержавеющей стали (Бриджмен)

Попутно отметим интересную диаграмму Бриджмена (рис. 5), рисующую изменение сопротивления деформированию (предела прочности) с ростом гидростатического давления. В то время, как для двух неаустенитных сталей влияние гидростатического давления практически отсутствует, для аустенитных, наоборот — вероятно, в связи с мартенситными превращениями — прирост предела прочности достигает весьма значительной величины в ~ 40% при давлении в 30 000 ат. Это обстоятельство чрезвычайно характерно, указывая на ту осторожность, с которой следует вырабатывать общие механические законы прочности и пластичности, и подчеркивает необходимость учета видовых особенностей различных материалов (о чем уже говорилось вначале).

О влиянии радиальных напряжений на сопротивление срезу говорит и Орован (12) в своей недавней лекции о прочности, критикуя «единую теорию» Фридмана: он указывает на резкое повышение истинного сопротивления разрыву при испытании протянутых и прокатанных образцов. Здесь, конечно, в основном имеет место то же самое явление — повышение сопротивления срезу вследствие радиальных напряжений.

Не только при растяжении, но и при сжатии всестороннее давление увеличивает прочность материалов, разрушающихся от скола. Так, еще Рош и Эйхингер (13), сжимая чугунные образцы при 2 000 ат всестороннего давления, получили для них при неизменном пределе прочности увеличение пластичности с 18 до 58% уменьшения высоты. Образцы из алюминиевой бронзы показали прирост истинного предела прочности от 7 до 11 кг/мм² и увеличение пластичности с 11 до 28 % уменьшения высоты.

В связи с этим было бы интересно провести опыты по кручению при одновременном воздействии гидростатического давления, до сих пор не описанные в литературе. Бриджмен (14) в 1943 г. сделал попытку учесть влияние осевого сжатия на сопротивление срезу при кручении. Применяя образцы с круговым надрезом, он показал, что осевое сжатие увеличивает это сопротивление до двух раз. С точки зрения развитых выше представлений, одно-стороннее сжатие не должно было бы повышать сопротивления срезу. Однако полученный результат объясняется, видимо, тем, что при добавлении сжимающей силы плоскость наибольших касательных напряжений скручиваемого образца перестает быть перпендикулярной к его оси, а между тем надрез создает вынужденное положение плоскости разрушения. Это обстоятельство затрудняет срез, а вместе с тем сильно усложняет опыт. Результаты его трудно поддаются анализу.

Если, таким образом, всестороннее напряжение сжатия увеличивает пластичность, а следовательно и истинный предел прочности, то всестороннее растяжение должно их уменьшать. Проявление этого влияния мы можем усмотреть в том факте, что, как это неоднократно указывалось, разрыв растягиваемого образца всегда начинается в средней части шейки, где объемное напряженное состояние достигает наибольшего выражения. С точки зрения простой теории постоянства сопротивления срезу этого явления объяснить нельзя.

О понижении прочности на срез должны подробнее сказать нам опыты с растяжением надрезанных образцов, в которых наряду с осевыми появляются и радиальные напряжения. К сожалению, возможность количественного ответа здесь крайне затрудняется сложностью напряженного состояния в надрезе и еще большей трудностью его анализа по сравнению с шейкой растягиваемого образца. Так, Мак-Адам, который много поработал с растяжением надрезанных образцов, не сумел распутать завязанного им узла и пришел к пессимистическому выводу о необходимости иметь дело с бесконечно большим числом констант прочности, характерных для каждого вида тензора напряжений. В своей работе, доложенной на упомянутом уже совещании в Чикаго, о которой председатель собрания Гензамер выразился, что она «hard to read and understand», он пытается дать обобщенные графики для осесимметричного напряженного состояния; однако они мало помогают общему пониманию природы явления.

Наоборот, Закс с сотрудниками (15) с помощью последовательного и методически проведенного анализа недавно сумел довольно убедительно отделить эффект концентрации напряжений от эффекта объемности напряженного состояния («трех-

осность»). Это дало ему возможность установить основные законы влияния надреза на прочность. Для вязкого разрушения (когда концентрация напряжений в надрезе еще не сказывается) и осесимметричной нагрузки Закс приходит к следующей формуле:

$$S_F = S_{F_0} + \alpha S_r,$$

где S_F — истинное сопротивление разрыву при наличии радиального напряжения S_r ; S_{F_0} — то же в отсутствии этих напряжений; α — некоторый коэффициент, имеющий значение, промежуточное между 2μ (где μ — постоянная Пуассона) и 1. Первое значение, как нетрудно видеть, отвечает второй теории прочности (постоянство упругой деформации), второе — теории наибольших касательных напряжений. Истина, по мнению Закса, лежит где-то между этими двумя теориями. По его расчетам α имеет значение около 0,8, т. е. весьма близкое к теории постоянства сопротивления срезу (рис. 6)

Как видим, сама структура формулы Закса не связана с природой напряжений, ответственных за разрушение, и это ее недостаток. Нам казалось бы более правильным, твердо став на почву касательных напряжений, построить и формулу прочности для них, исходя из следующих соображений.

Появление радиальных напряжений, создаваемых надрезом, вызывает увеличение осевых нормальных напряжений для той же деформации сдвига на всю их величину и создает отрицательное гидростатическое давление, или всестороннее растяжение; это гидростатическое растяжение, согласно вышесказанному, уменьшает сопротивление

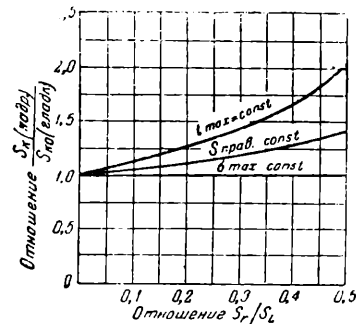


Рис. 6. Влияние радиального напряжения S_r на прочность надрезанного образца $S_{кн}$ по трем теориям прочности: наибольших нормальных ($S_{max} = const$), приведенных ($S_{прив} = const$) и касательных ($t_{max} = const$) напряжений (Закс)

срезу на величину, оцениваемую путем умножения радиального напряжения на некоторый множитель. Тогда формула прочности напишется так:

$$t = t_0 - \beta S_r,$$

где t_0 — сопротивление срезу при отсутствии радиального напряжения (созданного надрезом и шейкой; роль объемности, появляющейся в шейке, Заксом не учитывалась, что требует поправки); β — некоторый коэффициент.

На рис. 7 и 8 представлено изменение диаграммы растяжения согласно обеим формулам, т. е. в нор-

мальных (рис. 7) и касательных (рис. 8) напряжениях, для случая поперечного растяжения: надразов *A* и поперечного сжатия *B*. Из этих диаграмм ясно видно, что пластичность при поперечном растяжении уменьшается, а при поперечном сжатии — увеличивается.

Это давно установленное уменьшение пластичности при растяжении образцов с надрезами само по себе уже могло свидетельствовать о том, что сопротивление срезу не остается постоянным, а меняется с изменением вида напряженного состояния. Действительно, пластическая деформация определяется касательными напряжениями, а, следовательно, уменьшение пластической деформации

свидетельствует и о снижении сопротивления срезу. Однако здесь могло бы быть выдвинуто возраже-

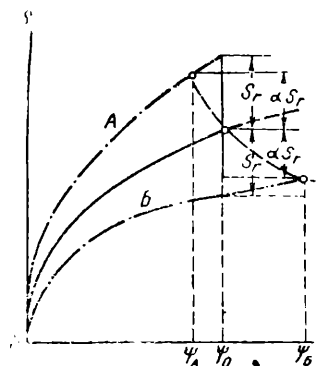


Рис. 7. Схема, объясняющая предполагаемое влияние радиальных напряжений S_r на сопротивление деформированию и разрыву при растяжении, выраженное в нормальных напряжениях

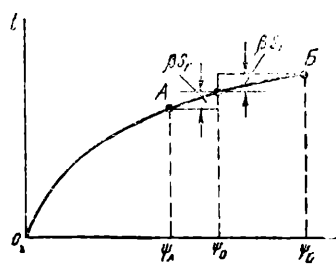


Рис. 8. Схема, объясняющая предполагаемое влияние радиальных напряжений S_r на сопротивление деформированию и срезу при растяжении, выраженное в касательных напряжениях

ние, что деформация в надрезанном сечении распределяется неравномерно, и в точке, с которой начинается разрыв (для неострых надразов по середине), достигает той же критической величины, что и при разрыве гладкого образца.

Для проверки этого предположения недавно мною совместно с Н. Г. Мокшневской в ВИАМ (16) было произведено микроскопическое исследование поперечного сечения разорванного образца из железа АРМКО, снабженного полукруглым надрезом (диаметр образца в выточке 15 мм, радиус и глубина выточки — 5 мм). Мы применили метод, по которому ранее было изучено распределение деформаций в шейке. Под микроскопом сосчитывалось число зерен, пересекаемых отрезком определенной длины, в разных точках и разных направлениях. Оказалось, что число это в пределах точности метода получалось везде одинаковым. Сужение, вычисленное по этим измерениям, сделанным до и после разрыва, хорошо (до 2—3%) совпало с общим сужением надрезанного сечения, но оказалось меньшим, чем для гладкого образца: 53% вместо 69%, при повышении истинного сопротивления разрыву с 70 до 77 кг/мм². Таким образом, следует признать, что общее уменьшение пластичности надрезанного образца точно воспроизводит уменьшение пластичности материала и является реальным фактом.

Выше мы говорили об изменении формы чашечки при всестороннем сжатии. Теперь можем объяснить это явление. Согласно сказанному, разрыв в плоской части чашечки — на ее дне — при

обыкновенном растяжении вызывается срезом, о чем свидетельствует ее характерный «ворс», а в некоторых случаях и излом типа «звездочки».

Как показывают опыты, этот разрыв начинается по середине (рис. 9А), там, где радиальные напряжения достигают максимума, вследствие чего металл находится в наиболее разрыхленном, а потому и ослабленном состоянии (влияние всестороннего растяжения!). Эта разрыхленность и разьединенность кристаллитов и делает возможным разрыв от среза не по плоскости наибольших касательных напряжений, а по сечению, нормальному к оси образца, где сосредоточена максимальная деформация.

По мере того, как трещина распространяется наружу, она попадает в области, в которых радиальные напряжения выражены все слабее, пока наконец отсутствие должного разрыхления не затормозит разрушение в плоскости поперечного сечения, и новая трещина не побежит уже по направлению наибольших касательных напряжений, т. е. по конусу.

Присутствие при гидростатическом сжатии радиальных сжимающих напряжений создает наружную кольцевую зону, в которой растягивающих радиальных напряжений нет, и сужает зону растягивающих радиальных напряжений в середине образца (рис. 9Б), образуя дно чашечки. Это и увеличивает относительную долю среза по конусу.

3. Переходим теперь к третьему положению теории Фридмана, введенному для объяснения с единой точки зрения случаев хрупкого разрушения при сжатии или боковом давлении, — о применении для хрупкого разрушения гипотезы Сен-Венана (приведенных напряжений). Это положение, пожалуй, имеет еще наиболее слабое экспериментальное обоснование и нуждается для проверки в многочисленных опытах. В частности, по отношению к металлам можно упомянуть об одном проведенном в нашей лаборатории эксперименте, который как будто говорит против этой теории.

Рассмотрим случай изгиба при низкой температуре круглой пластинки, опертой по контуру, силой, приложенной в ее центре. В этой точке на растянутой стороне пластинки возникает плоское напряженное состояние при двух равных главных напряжениях. С точки зрения теории Мизеса—Генки, такое напряженное состояние не повышает предела текучести против одноосного напряженного состояния. Если теперь для хрупкой прочности принять гипотезу Сен-Венана, то появление второго главного

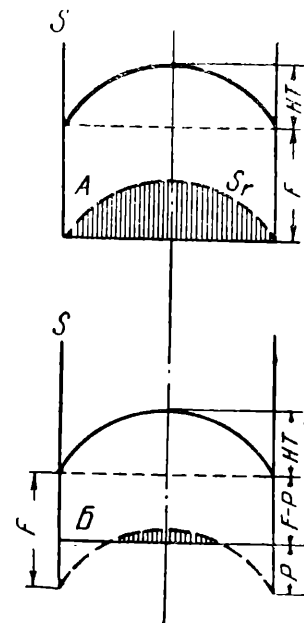


Рис. 9. Схема, показывающая существование в шейке зоны растягивающих радиальных напряжений (заштрихованы) при отсутствии (А) и при наличии (Б) гидростатического давления (обозначения Бриджмена, кроме S_r — для радиального растяжения)

напряжения того же знака должно уменьшить деформацию и, следовательно, повысить прочность. В итоге, согласно известной схеме Иоффе, критическая температура хладноломкости должна понизиться против случая изгиба в одной плоскости узкого образца. Опыт же показал, что для отожженной мягкой стали критическая температура или остается без изменения, или (в отдельных случаях) даже несколько повышается, но во всяком случае не понижается.

Однако здесь нужно сказать, что хрупкое разрушение металлов при сжатии обычно происходит от среза (скола) по плоскости наибольших касательных напряжений (чугун, высокопрочная сталь) и, следовательно, должно подчиняться закону постоянства сопротивления срезу.

Во избежание дальнейших недоразумений, напомним следующее: как мы указывали в свое время в предисловии к «Единой теории прочности», сопротивление отрыву увеличивается с пластической деформацией растяжения и уменьшается с деформацией сжатия (17). Таким образом, константой следует считать только сопротивление отрыву ненаклепанного металла.

4. Последний вопрос касается деформации при вязком разрушении, т. е. величины пластичности, измеренной тем или другим способом. Если стоять на той, довольно хорошо оправданной опытом, точке зрения, что наибольшие (или октаэдрические) касательные напряжения однозначно связаны с наибольшими (или октаэдрическими) углами сдвига, тогда вопрос о величине деформации при разрушении должен считаться предрешенным существованием критического значения сопротивления срезу: деформация при вязком разрушении также должна получаться всегда одинаковой.

Между тем, действительность часто говорит о противоположном. Это непостоянство пластичности, быть может, лучше всего проявляется при сопоставлении кручения с растяжением. Сошлемся на опыты Фридмана и Володиной (18) со сталью хромансиль, результаты которых для одной плавки и различных температур отпуска показаны на рис. 10.

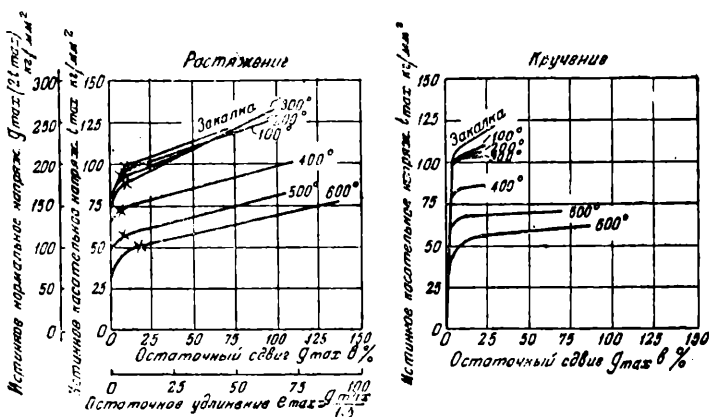


Рис. 10. Испытание на растяжение и кручение стали «хромансиль» при разных температурах отпуска (в координатах «истинные касательные напряжения — наибольший сдвиг») (Фридман и Володина)

Обращает на себя особенное внимание громадное различие в пластичности при низких температурах отпуска (табл. 3).

Таблица 3

Истинный сдвиг	Температура отпуска для стали с 0,30%С					
	100°	200°	300°	400°	500°	600°
Растяжение, % . . .	80	95	100	110	105	140
Кручение, %	25	25	25	25	70	85

Такое различие, казалось бы, должно быть связано и с различием в сопротивлении срезу. А между тем, если пересчитать напряжения при растяжении исходя из анализа напряженного состояния в шейке, проведенного автором вместе с Спиридоновой (20), и, вычислив касательные напряжения при растяжении, сопоставить их с напряжениями при кручении, то в большинстве случаев получается вполне удовлетворительное совпадение (впрочем, как правило, кручение дает немного более низкую прочность). Как понять такое противоречие? Не является ли оно следствием неправильного вычисления напряжений при пластическом кручении? Этот подсчет делался по известной формуле Лудвика—Кармана—Надаи:

$$t = \frac{1}{2\pi r^3} \left(3M + \vartheta \frac{dM}{ds} \right).$$

Можно усомниться в правильности этой формулы, и, во всяком случае, желательно проверить ее на опыте, поскольку в основе ее лежит предположение о сохранении радиусами поперечного сечения прямолинейного очертания. Для проверки, произведенной Фридманом по моей просьбе, по радиусу образца было высверлено отверстие и плотно заполнено стержнем из другого материала той же твердости. После доведения образца кручением до разрушения, он был распилен по оси стержня, который, как оказалось, полностью сохранил свою прямолинейную форму.

Проверка самой формулы Лудвика—Надаи была недавно произведена мною в ВИАМ совместно с Мокиевской и Тимофеевой (19) на основе того бесспорного положения, что «рабочие» напряжения при пластической деформации можно рассматривать как сумму остаточных и упругих, т. е. создаваемых при упругом нагружении образца тем же скручивающим моментом. Остаточные напряжения измерялись методом последовательного стачивания слоев металла, упругие — вычислялись по формулам сопротивления материалов. Совпадение получилось прекрасным, расхождение составило лишь 2%.

Таким образом, значительное расхождение деформаций при довольно удовлетворительном совпадении напряжений является бесспорным фактом. Понять его можно, учтя следующее обстоятельство.

Диаграмма растяжения при кручении имеет на большей части своего протяжения очень малый наклон, она почти горизонтальна. Иными словами, деформация протекает практически без упрочнения, что особенно сильно выражено у меди, как об этом свидетельствуют известные опыты Тейлора и Куинни. Вспомним, что они даже устанавливали точку, в которой упрочнение заканчивается и прекращается отток энергии на образование остаточных напряжений 2-го и 3-го рода, а между тем разрушение еще не наступает и деформация продолжается дальше.

Все это говорит о том, что при далеко заведенной деформации и незначительном упрочнении пре-

дельная величина пластического сдвига может быть в разных условиях сильно разнящейся. Другими словами, для получения разрушения условие достижения касательным напряжением критического значения оказывается необходимым, но не достаточным. Есть еще какое-то второе условие — исчерпание при данном или близком к нему напряжении некоей способности материала к пластической деформации. Таким образом, переносить сразу сопротивление срезу на диаграмму деформации (как это делает Фридман) и определять этим способом предельную пластичность не всегда возможно.

Однако есть еще одно вполне правдоподобное соображение, которое может пролить свет на парадоксальные результаты опытов Фридмана и Володиной. Дело в том, что опыты эти производились на мощной 600-килограммометровой машине Амслера, предназначенной для испытания крупных деталей и потому недостаточно приспособленной для тонких образцов диаметром 10 мм и менее. Рассматривая плоскость среза образца, можно было всегда обнаружить признаки неудовлетворительной центровки машины: ядро образца, разрушающееся последним, всегда выделяется своим особым видом; и вот, несмотря на все старания, его не удавалось загнать в центр сечения. Всегда имел место некоторый перекосяк; а влияние перекосяка из опыта испытания на растяжение (21) нам хорошо известно: оно проявляется в снижении прочности (а следовательно, и пластичности) только на сталях с низким отпуском и остается безвредным для более мягких разновидностей. Таким образом, малый угол закручивания высокопрочного хромансиля явился следствием не свойств металла, а дефектов испытания. Тогда становится понятным и то, что угол закручивания является единственной механической характеристикой гладких образцов, идущей параллельно с чувствительностью к надрезу. Очевидно необходимо обратить особое внимание на идеальную коаксиальность обоих захватов крутильных

машин, что, по всей вероятности, может быть достигнуто только путем конструирования и построения новых, более совершенных типов этих машин.

Если высказанное здесь соображение подтвердится и проверочные опыты возвратят высокопрочным сталям их утерянную было пластичность — отпадет еще одно лишнее возражение против «единой» теории.

Резюмируя все сказанное, мы можем прийти к следующему заключению. Пессимизм Бриджмена, Мак-Адама и других не приходится считать оправданным. Единая теория прочности возможна, и начало ее, положенное Фридманом, следует считать вполне разумным. Однако пока теория эта является только первым приближением. Необходимы разно-сторонние, широко поставленные опыты, для того чтобы внести в нее надлежащие поправки.

Эти поправки мыслятся в следующих направлениях:

1. Область применения теории должна быть ограничена материалами, на деформацию и разрушение которых не оказывают существенного влияния физико-химические процессы.

2. Необходимо учесть влияние на сопротивление срезу всестороннего растяжения или сжатия (т. е. шарового тензора, накладывающегося на тензор-девиатор) и установить количественные законы этого влияния.

3. В применении к хрупким отрывам надо сделать экспериментально оправданный выбор между теорией наибольших нормальных напряжений и теорией наибольших деформаций удлинения. В первом случае должна быть развита новая теория разрушения при сжатии хрупких тел.

4. Должна быть подробно исследована роль пластичности при разрушении от среза и выяснено, не является ли она самостоятельной характеристикой разрушения, дополняющей в подлежащих случаях (при малом упрочнении) характеристику сопротивления срезу.

ЛИТЕРАТУРА

1. D. Mc Adam, Metals Technology. Dec., 1944, T. P. 1782, 5.
2. P. Bridgman, *ibid.* 32.
3. Я. Б. Фридман, Единая теория прочности материалов. Оборонгиз, 1943.
4. С. И. Ратнер, „Заводская лаборатория“, 12, 1946, № 7—8, 730.
5. P. Bridgman, „J. Appl. Phys.“, 9, 8, Aug. 517, 1938.
6. М. В. Якутович, Письменное сообщение.
7. E. Davis, „J. Appl. Mech.“, 12, March 1, A. 13, 1945.
8. C. Mac-Gregor and L. Coffin, „Appl. Mech.“ 13, March 1, A—71, 1946.
9. E. Stebel and A. Mater, „Zs. VDI“ 77, 1345, 1933.
10. P. Bridgman, „J. Appl. Phys.“, 17, 3, 201, 1946.
11. P. Bridgman, „Trans. ASM.“ 32, 553, 1944.

12. E. Orowan, „Trans. Inst. Engngs., & Shipbild. Scot.“, Jan. 165, 89, 1946.
13. M. Ros & A. Eichinger, Zürich, 1926.
14. P. Bridgman, „J. Appl. Phys.“, 14, 6, 272, 1943.
15. G. Sachs & J. Lubahn, „J. Appl. Mech.“, 1946 (preprint).
16. Н. Давиденков и Н. Мокневская, Отчет ВИАМ, 1946.
17. Н. Н. Давиденков и П. С. Сахаров, ЖТФ, 7, 675, 1937.
18. Я. Фридман и Т. Володина, „Заводская лаборатория“, 12, 1946, 9—10, 861.
19. Н. Давиденков и М. Тимофеева, Отчет ВИАМ, 1946.
20. Н. Давиденков и Н. Спиридонова, „Заводская лаборатория“, 11, 6, 523, 1945.

От редакции

Вопросы механических свойств материала и его прочности при сложных напряженных состояниях приобретают сейчас все большее значение при конструировании машин и разработке технологических процессов. Стремление сочетать результаты исследования свойств материалов с прочностью конструкций и с процессами их изготовления заставило искать целесообразные характеристики и критерии прочности, отображающие, с тем или иным совершенством, явления деформации и разрушения. Выдвигаются все новые гипотезы и теории прочности, позволяющие обобщать экспериментально наблюдаемые факты, расширяющие наши познания о качественной, а в ряде случаев и количественной стороне процес-

сов разрушения и деформирования. Успешная разработка этих вопросов в СССР и выдвинутые новые теории делают своевременным и актуальным обмен мнениями в печати.

По инициативе Комитета прочности Общества машиностроителей редакция журнала «Вестник инженеров и техников» публикует статью действительного члена Академии наук СССР Н. Н. Давиденкова, посвященную единой теории прочности материалов д-ра техн. наук, проф. Я. Б. Фридмана. Редакция и комитет обращаются с просьбой к специалистам, работающим в области прочности и смежных с ней, поделиться своими соображениями об единой теории прочности и о целесообразных направлениях разработки соответствующих вопросов.

К вопросу о рациональном методе получения блестящих гальванических покрытий

Д-р техн. наук, проф. В. И. ЛАЙНЕР

(Зам. председателя Комитета гальваностегии при ВСНИТО)

Закон о четвертом пятилетнем плане восстановления и развития народного хозяйства СССР предусматривает большой рост производства автомобилей, велосипедов, мотоциклов, патефонов, швейных машин и других изделий широкого потребления. Значительное количество деталей всех этих изделий при их изготовлении подвергается защитно-декоративным гальваническим покрытиям, связанным с трудоемкими ручными операциями. Большинство покрытий из обычных электролитов получается матовым и блеск сообщается им уже при последующей полировке на матерчатых кругах с соответствующей пастой. Полировку можно механизировать лишь для изделий цилиндрической формы. Для плоских же изделий это значительно сложнее, а для изделий неправильной формы — практически невозможно.

В годы Отечественной войны защитно-декоративные гальванические покрытия применялись весьма ограниченно. С переходом нашей промышленности на выпуск гражданской продукции такие покрытия используются все чаще и чаще, между тем как квалифицированных полировщиков у нас не хватает.

В настоящее время наиболее распространенным видом защитно-декоративных гальванических покрытий является комбинированное медно-никелево-хромовое. Процесс покрытия заключается в следующем: стальные изделия после тщательной механической подготовки (шлифовки и полировки) покрываются тонким слоем меди в цианистом электролите, затем более толстым слоем меди в кислом электролите, потом никелируются и, наконец, хромируются. После меднения в кислом электролите и никелирования изделия полируются. После каждой полировки они тщательно обезжириваются, промываются, декапируются и вновь промываются. Как это видно, технологический процесс такого хромирования весьма громоздок. Изделия несколько раз возвращаются из одного отделения (ванного) в другое (станочное), точность становится невыполнимой. Защитные свойства гальванических покрытий в процессе полировки снижаются, нередки случаи полного сползновения покрытия на углах и ребрах.

Можно наметить два метода рационализации процесса получения блестящих гальванических покрытий и, в частности, защитно-декоративного хромирования:

- 1) непосредственное получение блестящих гальванических покрытий без всякой полировки;
- 2) замена механической полировки матовых гальванических покрытий электролитической полировкой, при которой ручной труд сводится лишь к монтажу и демонтажу обрабатываемых изделий с закреплённых приспособлений (подвесок).

Положительное решение первого вопроса казалось бы лишает смысла стремление разрешить второй вопрос. Однако необходимо отметить, что первые исследования в области электролитических методов полировки гальванических покрытий появились, примерно, двадцатью годами позже выдачи первых патентов по непосредственному получению блестящих гальванических покрытий. Таким образом, непосредственное получение блестящих покрытий связано с определенными затруднениями, и, в зависимости от конкретных условий, оба метода могут конкурировать или друг друга дополнять.

В США, примерно, 40% всех установок по никелированию работают на электролитах, предназначенных для блестящего никелирования. Среди них имеются весьма крупные, емкостью до 140 тыс. л. Однако Хотзерсолл¹ отмечает, что в США почти нет установок, где никелевые покрытия получались бы блестящими в полном смысле этого слова. Обычно после никелирования требуется легкая полировка.

Сравнительно нетрудно получать блестящие тонкие никелевые покрытия, если поверхность основного металла надлежащим образом подготовлена. Задача становится сложнее при относительно толстых никелевых покрытиях, достаточных для защиты от коррозии.

К ваннам блестящего никелирования предъявляются следующие требования:

- а) покрытия должны получаться с ярким блеском в слоях значительной толщины;
- б) контроль электролита должен быть доступен рядовым аналитикам;
- в) электролиты должны допускать применение высокой плотности тока;
- г) рабочий интервал (колебания pH, температуры, плотности тока) должен быть достаточно широкий;
- д) электролит должен обладать хорошей рассеивающей способностью;
- е) быть достаточно устойчивым и не подверженным влиянию незначительных отклонений от установленного режима;
- ж) корректирование электролита должно осуществляться путем периодического или регулярного добавления компонентов;
- з) электролит должен допускать нагрев, перемешивание, фильтрацию и пр.

Преимущества блестящего никелирования не ограничиваются экономией рабочей силы, материалов и времени за счет сокращения большого количества дополнительных операций. Толщина самого блестящего никелевого покрытия может быть, по

¹ A. W. Hotherhall, Electroplating in U. S. A. Met. Industry, vol. 68, № 23, 7/VI 1946.

крайней мере, на 20% меньше толщины матовых покрытий при сохранении тех же защитных свойств, так как в процессе полировки удаляется около 20% от первоначальной толщины слоя. В ваннах блестящего никелирования обычно применяется повышенная, почти удвоенная плотность тока по сравнению с обычными электролитами. Однако широкое промышленное применение таких ванн ограничивается рядом их недостатков.

Основные компоненты электролитов, предназначенных для получения блестящих никелевых покрытий, не отличаются от обычных, если не считать их несколько повышенной концентрации. Помимо этих компонентов в электролит входят добавочные агенты, которые и обуславливают получение блестящих покрытий. Концентрацию никеля поддерживают на уровне 75–90 г/л, хлоридов около 13–36 г/л и борной кислоты 37 г/л.

Различают два типа электролитов, получивших промышленное применение для блестящего никелирования:

- а) электролиты, содержащие соли кобальта,
- б) электролиты с сульфоновыми соединениями ароматических кислот.

В 1937 г. на автозаводе им. Сталина был проверен процесс блестящего никелирования в электролите, содержащем кобальт в виде сернокислой соли (американский патент № 20267118, выданный 1 января 1936 г. Вайсбергу и Стоддарду). Состав электролита следующий (в г/л): сернокислый никель — 240, хлористый никель — 45, сернокислый кобальт — 15, борная кислота — 30, муравьинокислый натрий — 35, сернокислый аммоний — 2,5, формальдегид (40%) — 2,5. Режим: температура 60–65°, плотность тока 4–5 А/дм², pH = 3,7–3,9; электролит непрерывно фильтруется и перемешивается.

Под руководством Н. Т. Кудрявцева выполнено исследование (подтвержденное в производственных условиях) по получению блестящих никелевых покрытий в результате введения в электролит натриевой соли 2,6 или 2,7 дисульфонафталиновой кислоты.

Аналогичный электролит, предложенный Степановым и Лященко, проверялся с удовлетворительными результатами на автозаводе им. Сталина. Состав электролита был (в г/л): сернокислый никель — 120–160, никель в форме сульфированного нафталина — 5–6, борная кислота — 25–30, хлористый натрий — 10–15, нафталин в форме продукта реакций сульфированного нафталина с аммиаком — 1. Режим: температура 18–25°; D_k — 0,5–1,35 А/дм² при неподвижном катоде; D_k — 0,5–2,25 А/дм² при движении катода; pH = 4,0–5,5; выход по току 95–97%.

Производственная проверка этого электролита показала, что если довести основные компоненты (никелевую соль и хлориды) до нормального состава типа Уаттса, то можно при pH = 4,9–5,3, повышении температуры до 30–35° и энергичном воздушном перемешивании получать блестящие никелевые покрытия при плотности тока 3 А/дм².

Из 2 тысяч деталей, средней поверхностью около 3,5 дм² каждая, половина совершенно не требовала полировки, а остальные нуждались лишь в легкой полировке.

Поверхность медного слоя необходимо отполировать до высокого блеска, всякие следы пальцев

(появляющихся на изделиях при их монтаже на подвески) должны быть тщательно удалены. Тщательная подготовка поверхности основного металла или промежуточного слоя является неизменным условием. Чувствительность к примесям как органического, так и неорганического происхождения, вообще характерная для процесса никелирования, возрастает при получении блестящих никелевых покрытий непосредственно из ванн.

Железа допускается в количестве не более 0,5%, меди, цинка и свинца — до 0,001%. Эти примеси появляются при растворении в электролите окисных пленок с поверхности покрываемых изделий в результате анодного растворения, попадания цеховой пыли и т. п. При увеличении содержания примесей покрытия получаются матовыми или полублестящими, еще чаще — пестрыми, блестящими — на участках с большой плотностью тока, и тусклыми — на участках с меньшей плотностью тока. Другим недостатком, характерным для блестящих покрытий, является их повышенная хрупкость.

Хотя в различных патентах предусмотрено введение солей некоторых металлов, способствующих образованию блестящих никелевых покрытий, практическое осуществление этого метода затруднено. Введение солей кадмия в течение ряда лет применялось в промышленных масштабах, но в настоящее время отставлено. До сих пор в промышленности употребляются лишь соли кобальта, однако при отсутствии органических соединений никелевые покрытия из таких электролитов получаются хотя и светлыми, но не блестящими.

Органические соединения, способствующие образованию блестящих никелевых покрытий, можно насчитать сотнями. Делались попытки систематизировать специфическое влияние различных групп органических блескообразующих¹. В качестве исходного выбран электролит состава: $\text{Ni SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ — 170 г/л, $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ — 30 г/л, H_3BO_3 — 25 г/л.

Водородный показатель поддерживался на уровне pH=5,8, температура около 22–23°, плотность тока в пределах 0,3–1,5 А/дм². На рис. 1 показано изменение отражения света никелевых покрытий из электролитов, не содержащих органических соединений, при различных длине волны и толщине покрытия. При толщине покрытия 15 мк отражение не превышает 5%. В присутствии солей кобальта отражение повышается, но все же в сильной степени зависит от толщины.

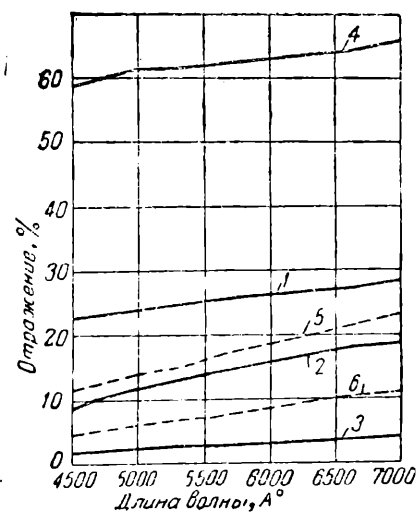


Рис. 1. Отражение никелевых и никелево-кобальтовых покрытий до и после полировки:

- 1 — толщина покрытия 3,5 мк
- 2 — толщина покрытия 8,0 мк
- 3 — толщина покрытия 15,0 мк
- 4 — полированное покрытие, 5 — покрытие Ni—Co толщиной 6,0 мк
- 6 — покрытие Ni—Co толщиной 12,0 мк

¹ Raub u Wittum, „Z. Elektroch.“, Bd. 46, № 2, 1911.

В присутствии спиртов блеск никелевых покрытий меняется незначительно.

Альдегиды и кетоны способствуют образованию блестящих никелевых покрытий. В присутствии формальдегида можно получить непосредственно из ванн никелевые покрытия с таким блеском, который лишь незначительно уступает покрытиям, полированным на матерчатых кругах. При нагреве этих покрытий распространяется неприятный запах в результате разложения органических соединений.

Азотистые органические соединения дают возможность получить никелевые покрытия с высоким блеском, но с пониженными механическими свойствами. Блеск увеличивается в незначительной степени при введении сотых долей грамма мочевины (или аналогичных соединений). Однако покрытия имеют тогда мелкие трещины и резко выраженный питтинг (рис. 2).

Серосодержащие органические соединения являются сильными блескообразующими. При введении 0,15 г/л тиомочевины блеск покрытия не уступает тому, который получается после полировки. В то же время покрытия



Рис. 2. Сильный питтинг в никелевом покрытии, полученном из электролита, содержащего тиомочевину. $\times 2$.

столь хрупки, что при малейшей деформации отслаиваются от основного металла. Аналогичное

влияние оказывают белковые соединения (альбумин, козеин, пентон, клей). В присутствии 0,01 — 0,05 г/л таких соединений можно получить никелевые покрытия с зеркальным блеском, но с большим количеством мелких трещин.

Влияние соединений ароматического ряда на блеск никелевых покрытий различно. Те из них, которые оказывают более сильное действие, одновременно способствуют понижению механических свойств покрытий.

Промышленные приемы имеют щелочные или никелевые соли ароматических сульфокислот. Покрытия, полученные в их присутствии, содержат серу в тем большем количестве, чем ниже катодная плотность тока (рис. 3).

Хорошим блескообразующим является β -нафталин-сульфокислый калий. Если наряду с ним при-

сутствуют незначительные количества кобальтовой соли, то механические свойства покрытий снижаются лишь немного; при большом содержании кобальта покрытия становятся хрупкими, проявляют тенденцию к отслаиванию.

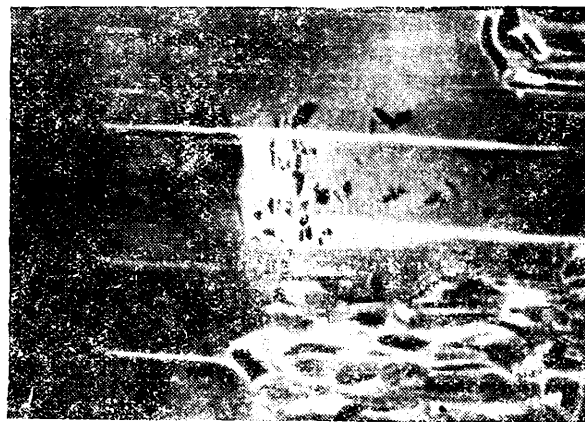


Рис. 4. Отслаивание блестящего никелевого покрытия, полученного в присутствии 2-нафтол-6-сульфокислоты. $\times 2$

В присутствии α - и β -нафтола, а также нафтолдисульфоновоокислого натрия получаются блестящие, но хрупкие покрытия с большим количеством мелких трещин. Такие покрытия иногда отслаиваются в ванне без какой-либо внешней деформации (рис. 4).

Подобное действие оказывают сульфированные азокраски — метилоранж, конго и др. На рис. 5 показаны трещины в никелевом покрытии, полученном в присутствии пептона.

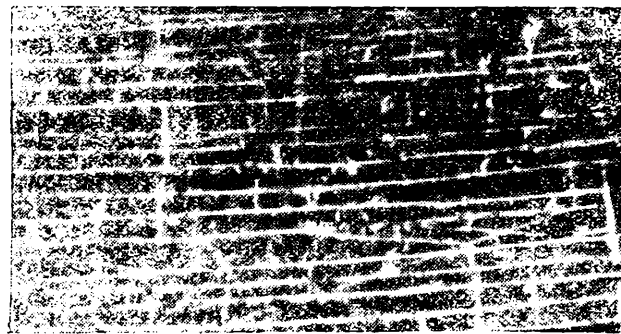


Рис. 5. Трещины в блестящем никелевом покрытии, полученном в присутствии пептона. $\times 50$

На основании приведенных данных можно сделать некоторые обобщения. Многочисленные органические соединения, вводимые в электролиты для никелирования с целью получения блестящих покрытий, могут быть разделены на 2 группы: сильные и слабые блескообразующие. В присутствии соединений первой группы получаются блестящие покрытия (независимо от их толщины и подготовки поверхности основного металла), отличающиеся, однако, пониженными механическими свойствами. Покрытия пронизаны мелкими трещинами, образующимися из-за внутренних напряжений, склонны к отслаиванию при деформации, а иногда отстают от основного металла в самой ванне без каких-либо внешних воздействий.

Слабые блескообразующие практически не оказывают влияния на механические свойства по-

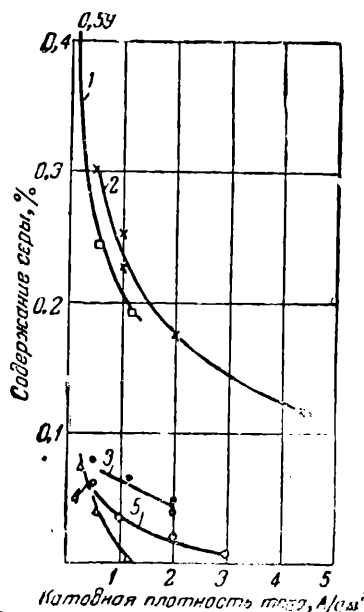


Рис. 3. Содержание серы в никелевых покрытиях, полученных из электролитов с ароматическими сульфокислотами.

крытий, но и блеск последних значительно уступает достигнутому при полировке.

Блестящие медные покрытия. Медь сравнительно редко применяется в гальванотехнике как самостоятельное покрытие, но очень часто служит промежуточным слоем при никелировании и декоративном хромировании. Из обычных цианистых и кислых электролитов медные покрытия получаются матовыми. В то же время механическая полировка омедненных изделий дает положительные результаты только в руках опытного полировщика. Случаи споллировывания медных покрытий — повседневное явление в гальванических цехах и является причиной повышенного процента брака.

Методы получения блестящих медных покрытий непосредственно из ванн, без последующей полировки, до сих пор значительного промышленного применения не имеют. По способу Саркисова и Ваграмяна (авторское свидетельство № 45783 от 31 января 1936 г.) блестящие медные покрытия могут образоваться при введении в электролит искусственного шелка и при интенсивном перемешивании.

Автозавод им. Сталина в 1939 г. получил авторское свидетельство (№ 26206) на способ получения блестящих медных покрытий при следующих условиях.

Состав электролита	Режим
цианистая медь . . . — 95 г/л	Катодная плотность тока 1—3 А/дм ²
цианистый натрий . . . — 120 „	Анодная плотность тока 0,75 А/дм ²
углекислый натрий . . . — 25 „	Температура . . . 35—50°
сегнетова соль . . . — 85 „	Электролит подвергается
нитрит натрия . . . — 20 „	непрерывной фильтрации;
окись ртути . . . — 0,025 „	катодные штанги находятся
свободный цианистый	в поступательно-возврат-
натрий — 7,5—10 „	ном движении с амплитудой 100 мм, со скоростью 10 циклов в минуту.

Сложный состав электролита, трудность его контроля и корректирования, а также необходимость энергичного движения катодов затрудняют промышленное его использование.

Американская фирма Дюпон рекламирует электролит для блестящих медных покрытий и продает готовые композиции. Рекомендуемый ею электролит имеет следующий примерный состав (в г/л): меди цианистой — 120, натрия цианистого (общего) — 135, натрия цианистого (свободного) — 3,75, едкого натра — 30, роданистого натрия — 15, «анти-питтинг» — 1,5.

Температура электролита поддерживается на уровне 70—80°. Плотность тока допускается свыше 10 А/дм².*

Получающиеся покрытия нельзя характеризовать как блестящие и можно назвать полублестящими. Лучшие результаты получаются при 100% катодном выходе по току или при самом незначительном выделении водорода на катоде.

Брокман со своими сотрудниками предложил для меднения вместо ядовитых цианистых электролитов аминовые соединения (этаноламин и этиленамин). Из таких электролитов можно получить полублестящие покрытия при 100% выходе по току. Электролиты имеют, однако, существенные недостатки: полублестящие осадки образуются в узких интервалах плотности тока и отличаются большой хруп-

костью, в результате чего практическая ценность электролитов мала.

Мы не будем здесь останавливаться на электролитах для блестящего цинкования, имеющих промышленное применение, так как цинковые покрытия не могут рассматриваться как декоративные.

Блестящие хромовые покрытия получают из общепринятых электролитов при соблюдении должного режима в отсутствии каких-либо блескообразующих, если поверхность основного металла или промежуточного покрытия имеет высокий блеск. Наибольший интерес, следовательно, представляют никелевые и медные покрытия.

Мы видели, что непосредственное получение блестящих никелевых и медных покрытий связано с рядом затруднений. По крайней мере в СССР, как правило, матовые покрытия получают из обычных электролитов и затем подвергаются полировке на матерчатых кругах. Нам представляется целесообразным и в ряде случаев возможным заменить этот метод полировки электролитическим.

Сущность электролитической полировки освещена в ряде журнальных статей¹. Обработываемые изделия завешиваются в подходящий электролит в качестве анодов и выдерживаются в течение определенного времени при таком режиме, который обеспечивает преимущественное или исключительное растворение микроскопических выступов, в то время как микроскопические углубления остаются нетронутыми. Электролитическая полировка получила большое промышленное применение в США и в настоящее время внедряется на ряде предприятий СССР для изделий из нержавеющей стали, алюминия высокой чистоты, меди и медных сплавов. Что касается электролитической полировки гальванических покрытий, то принципиально она осуществляется так же, как для соответствующих металлов или сплавов, но имеет свои особенности и некоторые затруднения производства.

Электролитическая полировка совершенно неприемлема для очень тонких гальванических покрытий. Если средняя толщина покрытия достаточна, но на отдельных участках покрытие значительно тоньше среднего, то не исключена возможность оголения в этих местах основного металла или промежуточного покрытия. Можно принять, что электролитическая полировка является своеобразным и эффективным методом контроля толщины и равномерности покрытия. В то время как при механической полировке наибольший съем металла происходит на выступах и краях изделий, причем в этих местах в процессе полировки иногда оголяется основной металл или промежуточное покрытие, при электролитической полировке такая опасность возникает лишь в углублениях, где фактическая толщина покрытия значительно меньше средней расчетной.

Электролитическая полировка никелированных изделий осуществляется в 70% серной кислоте при плотности тока 25—40 А/дм², температуре 30—40° и времени выдержки от 0,5 до 2,5 мин. Чем мельче структура

¹ В. И. Лайнер, «Журнал прикладной химии», т. XVIII, № 4—5, 1945, «Цветные металлы» № 3, 1946; Московский институт цветных металлов и золота им. М. И. Калинина, «Технология цветных металлов и сплавов», Сборник научных трудов, № 15, 1946, Металлургиздат.

* Herbert Bandes, „Metal Finishing“, march, 1946.

никелевых покрытий и чем лучше подготовлена поверхность основного металла или промежуточного покрытия, тем быстрее достигается блеск, не уступающий тому, который обычно получается при механической полировке. Анодный выход по току составляет 40—50% и при указанном режиме снимается в среднем около 2 μ .

Серьезным видом брака, с которым приходится сталкиваться при электролитической полировке никелированных изделий, являются различного рода изъязвления. Они бывают двух родов: значительные кольцевые и мелкие точечные, распределенные по всей поверхности. Первые получаются при низкой плотности тока и исчезают по мере повышения его плотности. Они могут появиться при наличии в электролите взвешенных частиц или в результате задержки на полируемых образцах газовых пузырьков из-за выступов и по другим причинам, затрудняющим удаление этих пузырьков. Природа мелких точечных изъязвлений, согласно различным литературным источникам, не исследована, а поэтому не предложено и методов борьбы с ними.



Рис. 6. Питтинг на никелированной поверхности после электрополировки. $\times 75$

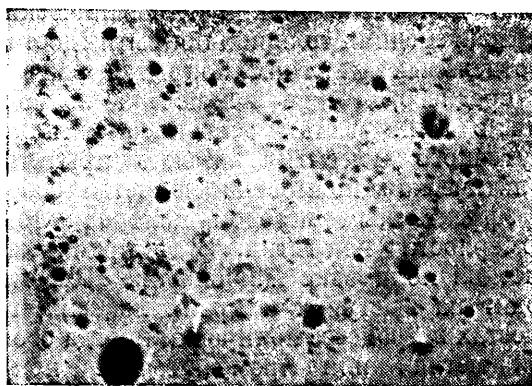


Рис. 7. Разъедание никелированной поверхности после электрополировки. Крупные изъязвления были видны на неполированном образце, мелкие выявлены в результате электрополировки. $\times 75$

Данный вопрос был нами всесторонне исследован¹ и полученные результаты позволяют считать, что мелкие точечные изъязвления не образуются в процессе электрополировки, а лишь выявляются ею. На микрофотографиях (рис. 6 и 7) приве-

дены никелированные образцы после электрополировки в 70% H_2SO_4 при плотности тока 40 A/dm^2 и температуре 40°; на этих образцах питтинг частично был виден до электрополировки. На другой микрофотографии (рис. 8) показан никелированный образец после электрополировки. До электрополировки никаких изъязвлений на нем не было видно.



Рис. 8. Разъедание никелированной поверхности после электрополировки. $\times 75$

На никелевом¹ образце (рис. 9) после электрополировки мелкие изъязвления не выступают.

Такие мелкие изъязвления не обнаруживаются при механической полировке, а наоборот, заполировываются. С аналогичным явлением сталкиваются



Рис. 9. Микрофотография поверхности никелевой ленты после электрополировки. $\times 75$

иногда при блестящем никелировании в присутствии органических соединений и попадании в электролит загрязнений.

Мелкие изъязвления особенно часто выступают при электрополировке плоских крупных изделий и редко наблюдаются на небольших изделиях сложной формы.

Электролитическая полировка омедненных изделий протекает в 70% ортофосфорной кислоте при условиях, аналогичных полировке медных и латунных изделий. Результаты электрополировки находятся в тесной зависимости от структуры медных покрытий. Общепринятая схема защитно-декоративного хромирования сводится к нанесению тонких слоев в медно-цианистых электролитах и более толстых слоев в кислых электролитах. Полировке обычно подвергаются только покрытия, полученные из кислых электролитов. Нами установлено, что главным усло-

¹ В. И. Лайнер и Ю. А. Величко, Московский институт цветных металлов и золота им. М. И. Калинина, 1946.

вием, обеспечивающим получение блестящей и равномерной поверхности, является физическая чистота меднокислого электролита, отсутствие в нем взвешенных частиц. Этого можно достигнуть при непрерывной или периодической, но частой фильтрации.

Несмотря на то, что при электролитической полировке поверхность обрабатываемых изделий находится в состоянии своеобразной пассивности, по окончании процесса она получается активной. При последующем гальваническом осаждении микроструктура основного металла или сплава воспроизводится в микроструктуре гальванических покрытий. С гальваностегической точки зрения такое положение имеет свои положительные и отрицательные стороны: на изделиях с электрополированной поверхностью, идеально сцепляющихся с гальваническими покрытиями, не удастся получить тонких блестящих покрытий (никелевых или хромовых).

Схема технологического процесса защитно-декоративного хромирования стальных изделий при механической и электролитической полировке

В зависимости от исходного состояния поверхности стальные изделия подвергаются шлифовке и полировке на кругах с различными номерами абразивных материалов. Затем изделия монтируются на навешивающие приспособления, обезжириваются, промываются в горячей и холодной воде, декапируются, вновь промываются и подвергаются предварительному меднению в цианистой ванне (или никелированию) на небольшую толщину. Затем промытые изделия переносятся в ванну кислого меднения, где наращивается слой заданной толщины. До этой операции последовательность идентична для механической и электрохимической полировки, в дальнейшем она отличается.

Схема при механической полировке: 1) промывка в холодной воде; 2) промывка в горячей воде; 3) демонтаж с подвесок; 4) полировка (глянцовка) по меди; 5) протирка; 6) контроль; 7) монтаж на подвески; 8) обезжиривание в органическом растворителе; 9) электролитическое обезжиривание на катоде и на аноде;

10) промывка в горячей воде; 11) промывка в холодной воде; 12) декапирование; 13) промывка в холодной воде; 14) никелирование; 15) промывка в холодной воде; 16) промывка в горячей воде; 17) демонтаж с подвесок; 18) полировка (глянцовка) по никелю; 19) протирка; 20) контроль; 21) монтаж на подвески; 22) электролитическое обезжиривание; 23) промывка в горячей воде; 24) промывка в холодной воде; 25) хромирование; 26) промывка; 27) сушка.

Схема при электролитической полировке: 1) промывка в холодной воде; 2) электрополировка меди; 3) промывка в холодной воде; 4) никелирование; 5) промывка в холодной воде; 6) электрополировка никеля; 7) промывка в холодной воде; 8) хромирование; 9) промывка; 10) сушка.

Сопоставляя обе схемы технологического процесса, нетрудно убедиться в преимуществах электролитической полировки. Помимо того что отпадают ручные весьма трудоемкие операции, нет необходимости в транспорте изделий из одного отделения в другое, сильно сокращается общее количество операций — отпадает обезжиривание и декапирование.

Нельзя сказать, что намеченная схема защитно-декоративного хромирования с применением электролитической полировки гальванических покрытий настолько проста, что ее можно рекомендовать для любых изделий независимо от их формы и размеров, а также от масштабов производства. Все эти факторы должны учитываться в каждом конкретном случае.

Нам представляется, что принятая в настоящее время схема защитно-декоративного хромирования с механической полировкой медных и никелевых покрытий нерациональна и нуждается в постепенной замене. Один путь — это более глубокое изучение методов непосредственного получения блестящих и пластичных покрытий, не требующих полировки. Другой путь — усовершенствование и постепенное внедрение электролитической полировки матовых гальванических покрытий, получающихся из обычных электролитов.

Пористое хромирование

Инж. Г. К. ШВЫРЯЕВ

(Ученый секретарь Комитета гальваностегии при ВСНИТО)

Замечательные свойства электролитического хромирования — хорошая химическая стойкость, износостойчивость, жаростойкость, красивый декоративный вид и хорошая отражательная способность — содействовали весьма быстрому и широкому внедрению его во многих отраслях нашего народного хозяйства.

В годы Отечественной войны особенно большое распространение имело твердое хромирование, которое применялось: 1) для восстановления деталей двигателей внутреннего сгорания, автомобилей, бронетанковых машин, самолетов (гильзы блока, цилиндров, поршневые пальцы, втулки шестерни, коленчатые валы и т. д.), 2) с целью увеличения срока службы предметов вооружения и 3) для повышения ресурса работы изделий путем нанесения слоя хрома на поверхность човых деталей.

Восстановление деталей до их нормальных размеров и придание им лучшей износостойкости путем покрытия твердым слоем хрома позволило быстро ремонтировать изделия и своевременно направлять их для дальнейшей эксплуатации.

По ориентировочным данным только по одной ремонтной сети авиационной промышленности было восстановлено много сотен тысяч различных деталей, что сэкономило десятки миллионов рублей и в несколько раз увеличило ресурс работы изделий.

По четвертому пятилетнему плану предусматривается все возрастающее развитие авиационного, автомобильного, железнодорожного и водного транспорта, станкостроения, моторостроения и др. При эксплуатации изделий этих отраслей промышленности в той или иной степени будут изнашиваться взаимотрущиеся детали. Поэтому восстановление

изношенных деталей при ремонте разнообразных изделий в мирное время приобретает чрезвычайно большое практическое значение.

Номенклатура деталей, которые могут подвергаться твердому хромированию, весьма обширна и в основном может быть расклассифицирована так:

1) исправление брака (уменьшение размеров), полученного при механической обработке новых деталей;

2) уменьшение зазоров между сопряженными деталями;

3) обеспечение необходимого натяга и устранение люфта;

4) восстановление изношенной рабочей поверхности деталей до номинальных размеров;

5) создание износостойчивой поверхности новым деталям, подвергающимся трению.

Для обеспечения дальнейшей максимальной эффективности в работе электролитического хрома необходимо в каждом отдельном случае правильно определять чистоту обработки поверхности и структуру хрома.

При хромировании с целью уменьшения зазоров, создания определенного натяга и для других, менее ответственных назначений, к структуре хрома и степени обработки его поверхности не предъявляется особых условий и требуется лишь необходимая толщина его слоя.

Для деталей, работающих на трение, электролитический хром должен отвечать особым требованиям (по своей структуре и окончательной поверхностной обработке), которые должны выполняться в соответствии со специфичностью работы каждой детали.

В зависимости от состава электролита и режима внешний вид поверхности осадков электролитического хрома может быть: а) матовым (светлосерым), б) блестящим и в) молочным.

Матовые (светлосерые) осадки обладают крупнокристаллической структурой и не рекомендуются для деталей, подвергающихся механическому износу при трении. Блестящие осадки имеют синевато-серебристую поверхность и находят преимущественное применение для большинства деталей, восстанавливаемых до номинальных размеров, или для защиты от механического износа. В процессе осаждения блестящего хрома в его осадке появляется сетка трещин самой разнообразной формы в зависимости от плотности тока и температуры. Это явление практически использовано для образования крупной пористости хрома.

В отличие от блестящих осадков молочные не имеют (или почти не имеют) сетки трещин и в некоторых случаях при работе на истирание по эффективности превосходят другие виды хрома.

Наряду с соответствующей структурой и поверхностным видом электролитического хрома для его успешной эксплуатации требуется также обеспечение определенной чистоты поверхности после окончательной механической обработки.

Весьма важным свойством электролитического хрома является его несмачиваемость водой и смазочными маслами. При эксплуатации деталей это приводит к образованию полусухого или сухого трения, очень вредно отражающегося на их дальнейшей работе. В большинстве случаев они быстро выходят из строя именно по этой причине.

Недостаточная смазка хромированной поверхности в процессе ее эксплуатации, особенно на двигателях внутреннего сгорания, приводит к следующим дефектам:

1) образованию продольных рисок и надиров;

2) дымлению и усиленному расходу масла;

3) быстрому износу взаимосопряженных пар (цилиндр — поршневое кольцо; шейка коленчатого вала — вкладыш подшипника и т. д.);

4) преждевременному выходу изделий из строя.

Практически на цилиндрах двигателей внутреннего сгорания была проверена в эксплуатации хромированная поверхность со следующей окончательной обработкой: а) шлифование; б) полирование и в) хонингование.

На полированной поверхности хрома образовалось значительное количество рисок и надиров. Таким образом, для данных деталей этот метод обработки рекомендовать нельзя (аналогичные результаты получились при полированной поверхности шеек коленчатых валов моторов водяного охлаждения). Шлифованная поверхность улучшает смазку, но получается усиленный износ сопряженной пары (поршневых колец, вкладышей подшипника и т. д.). На хонингованной поверхности заметно уменьшение износа поршневых колец, но все же наблюдаются небольшие продольные риски.

Таким образом, указанные методы обработки не обеспечили эффективной работы гильз блоков и цилиндров двигателей внутреннего сгорания. Появилась необходимость в создании на хромированной поверхности пор или «резервуаров» для удержания масла, что улучшит равномерность смазки рабочей (трущейся) части цилиндров и других деталей.

Хромированную поверхность можно обрабатывать механическим, химическим и электрохимическим способами.

В первом случае на поверхности хрома при помощи абразивных кругов и специальных фрез делаются спиральные канавки или выемки (углубления). Количество и размер таких углублений определяется специфическими условиями работы данной детали. При химическом способе происходит растравливание хрома соляной кислотой при помощи специальных сеток или изоляционного слоя, на котором наносится требующаяся пористость. При электрохимическом способе хром обрабатывается на аноде или катоде в растворах соответствующих кислот или щелочей.

Самым лучшим способом получения пористого хрома в настоящее время является электрохимический — анодный, находящий широкое практическое применение в различных отраслях промышленности. На многих производствах уже существуют крупные установки и цехи по пористому хромированию деталей двигателей внутреннего сгорания.

Сущность электрохимического способа заключается в обработке хромированной поверхности деталей в растворе хромовой кислоты «обратным» током, т. е. деталь заводится в качестве анода. В результате поверхность хрома приобретает либо слегка шероховатый вид, — так называемую, пористость «точечного» типа, либо ярко выраженную сетку трещин — пористость «канальчатого» типа.

При получении пористого хрома необходимо соблюдать вполне определенный режим.

Точечный тип пористого хрома рекомендуется для гильз дизелей, гильз насосов, поршневых колец, деталей станков, агрегатов и моторов, для которых требуется первоначальная притирка. Канальчатый тип хрома применяется для гильз блоков автомобильных моторов, гильз бронетанковых и авиационных двигателей внутреннего сгорания, цилиндров, коленчатых валов, деталей различных машин и локомотивов, работающих при больших удельных давлениях и повышенном числе оборотов.

Пористое хромирование практически возможно осуществлять как для восстановления изношенных так и для новых деталей, подвергающихся износу при трении. Пористый хром повышает срок службы изделий в 3—8 раз (рис. 1 и 2).

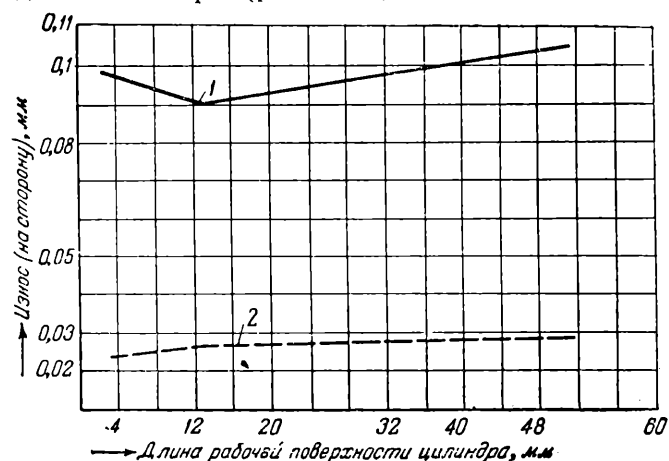


Рис. 1. Примерный износ хромированных и нехромированных цилиндров:

1 — цилиндр нехромированный; 2 — цилиндр с пористым хромом

По сообщениям американских исследователей, цилиндры с пористым хромом, установленные на маневровом локомотиве, после года регулярной работы (7 997 часов) не имели измеримого износа. Срок службы этих изделий повысился в 4—20 раз, поршневых колец — в 3—5 раз, задиры и риски от заедания поршнем и кольцами снизились до минимума. Гильзы с пористым хромом, установленные на автомобиле, работали более года (за это время было пройдено 110 000 миль). После осмотра износ составлял только 0,05 мм, причем расход масла в процессе эксплуатации значительно снизился.

Такие высокие показатели по эффективности применения пористого хрома привели к созданию в США многих специализированных заводов.

Широкое внедрение пористого хромирования в нашей промышленности увеличит работоспособность различных машин и агрегатов в несколько раз и позволит сэкономить многие миллионы рублей.

Технологический процесс получения пористого хрома состоит из следующих основных стадий:

- 1) механическая подготовка поверхности перед хромированием;
- 2) химическая подготовка поверхности;
- 3) хромирование;
- 4) получение пористости хрома;
- 5) механическая обработка хромированной поверхности;
- 6) очистка пористого хрома;
- 7) техконтроль.

Все детали, поступающие на хромирование, предварительно подвергаются техконтролю и обмеру

для определения толщины слоя хрома, необходимого для восстановления изношенной поверхности. Затем на каждую деталь составляются специальные карты обмера, в которые заносятся все данные, полученные до и после механической подготовки поверхности, после хромирования, «дехромирования»

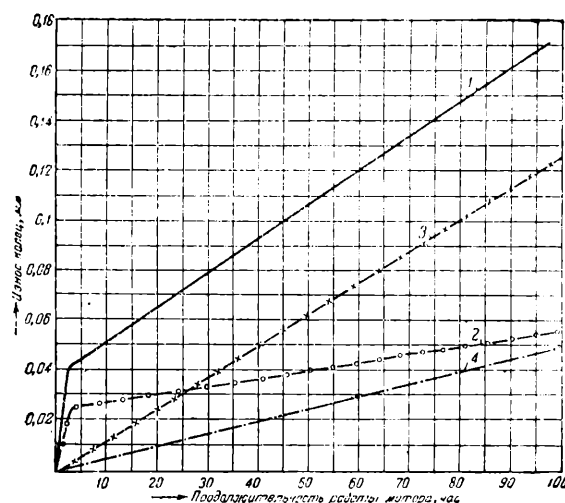


Рис. 2. Примерный износ хромированных и чугунных поршневых колец:

1 — износ чугунных поршневых колец; 2 — износ хромированных поршневых колец; 3 — износ зеркала цилиндров с чугунными кольцами; 4 — износ зеркала цилиндров с хромированными кольцами

и окончательной механической обработки пористого хрома.

Удаление неравномерностей износа с поверхности деталей и придание им правильной формы производится путем их шлифования на специальных станках абразивными камнями соответствующей зернистости и твердости.

Многие производственники считают, что для обеспечения лучшей приставаемости хрома к основному металлу необходимо придавать последнему некоторую шероховатость и рекомендуют ограничиваться только одной операцией механической подготовки — шлифованием.

Вообще, наибольшая сила сцепления осадков при гальванических покрытиях получается в том случае, когда кристаллы осаждающегося металла принимают ориентацию, соответствующую кристаллам основного металла и предыдущего слоя, и дают как бы непрерывное продолжение их роста¹. Поэтому для получения плотно пристающих осадков хрома необходимо, чтобы поверхность была свободна от каких-либо загрязнений. При пористом хромировании, когда требуется осаждать хром в «размер» с толщиной покрытия 0,1—0,2 мм на сторону, вопросу чистоты и состояния поверхности основного металла должно быть уделено большое внимание.

При любом гальваническом покрытии и при хромировании, особенно при толстых отложениях будут весьма ярко отображаться все неровности шероховатой поверхности и поэтому в последующем потребуется обязательная шлифовка для доведения деталей до номинальных размеров. Это будет отри-

¹ В. И. Лайнер и Н. Т. Кудрявцев, Основы гальваностегии, ч. I, изд. II, стр. 17.

цательно сказываться на качестве пористости хрома канальчатого типа.

Точное соблюдение режима при хромировании, в свою очередь, требует поддержания постоянного плотности тока, что может быть обеспечено только при хорошо обработанной и гладкой поверхности. Поэтому конечной механической обработкой поверхности деталей перед пористым хромированием (и вообще при твердом хромировании) следует считать полирование или хонингование.

Полирование производится путем обработки поверхности наждачной шкуркой, а хонингование — брусками соответствующей зернистости (при хромировании внутренних поверхностей цилиндрических деталей) до размеров 8—10 микродюймов. Последующая подготовка поверхности деталей состоит из удаления консервационной смазки, нанесения изоляции, обезжиривания и декапирования. Смазка удаляется в органических растворителях — бензине, керосине или, при большой производительности цеха, в трихлорэтилене.

Изоляция наносится на поверхность, не подлежащую хромированию. Изоляционным материалом может служить цапонлак (целлюлоид, растворенный в ацетоне), который наносится в 3—6 слоев, в зависимости от продолжительности хромирования, с обязательной просушкой каждого слоя.

При восстановлении внутренней поверхности крупных цилиндрических деталей необходимо следить за тем, чтобы вся оставшаяся поверхность не имела жировых загрязнений, лакокрасочных покрытий и других веществ, так как их присутствие в электролите вредно отражается на качестве хромовых осадков.

После нанесения изоляции детали монтируются на подвески и обезжириваются в растворах: щелочей электрохимическим способом или (крупные детали) протиркой кашицей венской извести.

Очистка поверхности от легких налетов окиси производится при помощи химического или электрохимического декапирования.

Для стальных деталей рекомендуется применять электрохимическое декапирование в растворе: 160—220 г хромового ангидрида и 1,2—2 г серной кислоты. Режим работы: температура 48—52°C. Плотность тока 35—40 А/дм². Продолжительность 0,5—1,5 мин. Увеличение продолжительности процесса приводит к неполному покрытию поверхности деталей хромом. Автором были проведены экспериментальные работы по проверке продолжительности декапирования в 5—10—15 мин. и во всех случаях при хромировании с плотностью тока до 50 А/дм² осадки хрома получались только на части поверхности.

Декапирование чугунных деталей лучше производить в 2—3% растворе плавиковой кислоты в течение 1—3 мин. Электрохимическое декапирование ухудшает пристаиваемость хрома к поверхности чугунных деталей.

Для предохранения раствора ванны хромирования от загрязнения железом электрохимическое декапирование следует вести в отдельной ванне.

После декапирования и тщательной промывки детали подвергаются хромированию в растворе: 250 г хромового ангидрида, 2—2,2 г серной кислоты, 1 л воды.

Основным фактором, влияющим на образование того или иного типа пористости хрома, является

правильный выбор режима работ для хромирования. При режиме, соответствующем получению канальчатого типа пористости, плотность тока и температура должны быть в строго определенном соотношении, так как иначе получится структура хрома не «предрасположенная» к образованию сетки трещин требуемой величины.

Исследованиями выявлено, что сетка трещин создается в процессе осаждения хрома от наличия в нем больших внутренних напряжений, которые при достижении максимума и соответствующей толщины разрывают хром, образуя пористость различной величины (рис. 3).

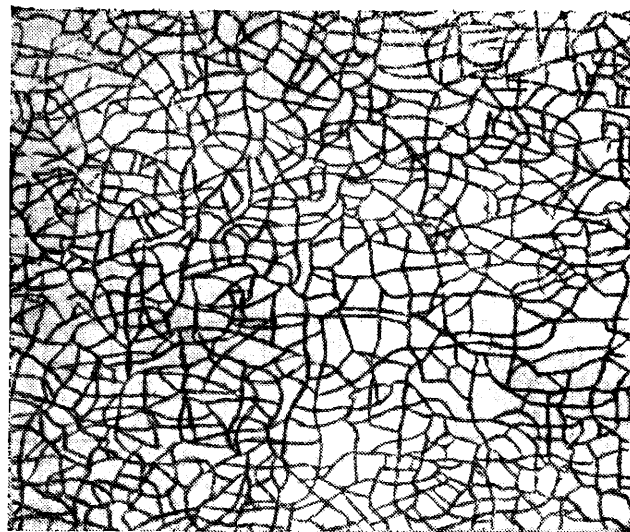


Рис. 3. Сетка трещин на хромированной поверхности деталей (после анодной обработки)

По сообщению Coyle¹ последующим осаждением хрома трещины закрываются, напряжения возрастают, затем образуются вторые трещины и т. д. На рис. 4 показано это явление. Резкие, ярко вы-

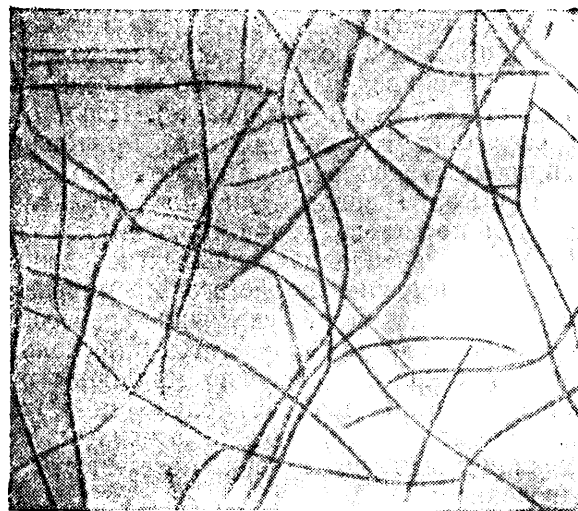


Рис. 4. Образование сетки трещин при осаждении хрома

раженные линии — открытые трещины, а еле заметные и выпуклые линии — закрытые трещины.

¹ Т. G. Coyle, Покрытие пористым хромом. Специальный выпуск статьи, представленной на 32-й ежегодной конференции Общества гальваностегов США, июнь, 1944.

В образовании пористости при проведении операции «дехромирования» участвуют как открытые, так и закрытые, первичные, вторичные, третичные и т. д. трещины.

Изменение режима хромирования — уменьшение плотности тока и температуры, а также увеличение температуры до получения молочных осадков, — дает пористость хрома точечного типа (рис. 5).

Влияние отдельных факторов на образование пористости определяется следующим образом. Плотность тока для получения канальчатого типа хрома колеблется в широких пределах. Практически такую пористость удавалось получать при плотностях тока от 50 до 75 А/дм². Поэтому соблюдение постоянства плотности тока при электролизе необходимо только

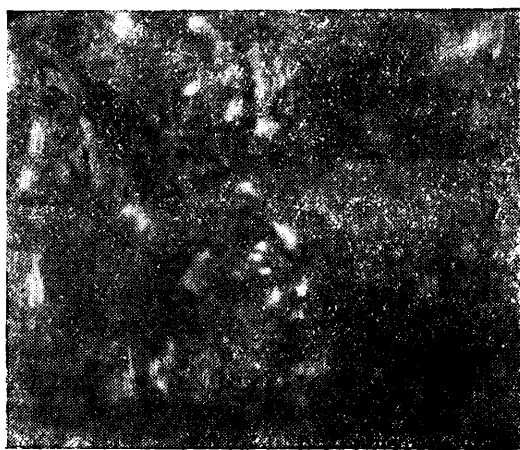


Рис. 5. Пористый хром точечного типа

для получения хромовых осадков заданной толщины. На практике рекомендуется 50—60 А/дм² для канальчатого и 45—50 А/дм² для точечного типов хрома.

Особенно большое влияние на пористость и размер сетки трещин имеет температура. При ее повышении (более 60°) сплошность хромовых покрытий увеличивается, сетка трещин делается более крупной (снижение общей пористости) и, наоборот, при уменьшении температуры (ниже 58°С) пористость переходит в точечный тип. При молочных осадках хрома также образуется точечная пористость.

При хромировании необходимо весьма точно регулировать температуру и не допускать ее колебания более чем на 2° С от установленной по режиму. На производстве рекомендуется применять 60—65°С для канальчатого и 50—54°С для точечного типа пористости.

Соотношение хромового ангидрида к SO₄ как 100 : 1 дает сетку трещин более мелкую, чем при соотношении 125 : 1. Наиболее эффективная канальчатая пористость получается при соотношении 115 : 125 : 1 и точечная при 100 : 125 : 1.

Содержание трехвалентного хрома должно быть не более 1—2% от концентрации хромового ангидрида. Продолжительность хромирования определяется в каждом отдельном случае по требующейся толщине слоя хрома.

В большинстве случаев пористое хромирование канальчатого типа в последующем не допускает шлифовки. Поэтому осаждение хрома производится в «размер». Таким образом, сила тока на каждую деталь должна регулироваться и поддерживаться индивидуально. Для этого на ваннах хромирования устанавливаются щитки самперметром, счетчиком

амперчасов и рубильниковым реостатом по количеству загружаемых изделий.

Поддержание постоянства состава электролита для хромирования обеспечивается своевременной корректировкой. Анализ и корректировка в зависимости от пропускной способности должны производиться почти ежедневно.

Хромирование в «размер» во многом зависит также от расположения, формы и состава анодов. Аноды лучше всего изготавливать из свинца, содержащего 6—8% сурьмы. Поверхность их перед каждой загрузкой должна тщательно зачищаться и иметь чистый металлический вид. Не допускаются глубокие раковины и плохие контакты. Форма анодов должна соответствовать форме покрываемой поверхности деталей или приближаться к ней.

При восстановлении цилиндрических деталей форму и расположение анодов надо устанавливать в соответствии с величиной цилиндра и равномерностью отложения хрома по всей его высоте. Практически выявлено, что в таких случаях требуется применять конусообразные аноды. Конусность анода определяется экспериментально для каждого цилиндра.

В зависимости от выработки и условий работы деталей толщина слоя хрома может быть от 0,1 до 0,25 мм на сторону.

Как уже указывалось, образование пористости хрома электрохимическим способом производится путем обработки деталей на аноде («дехромирование») в электролите, состав которого аналогичен ванне декапирования или хромирования.

Режим работы при получении точечного типа пористости на поверхности гильз дизелей, насосов, поршневых колец и т. д. применяется следующий: 1) плотность тока 35—45 А/дм²; 2) температура 50±2°С; 3) продолжительность для поршневых колец 8—12 мин., для других деталей 3—5 мин.

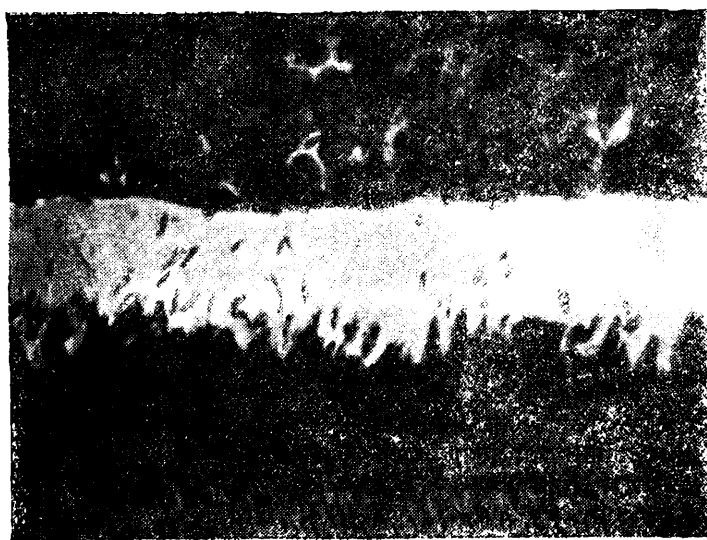


Рис. 6. Поперечный разрез пористого хрома точечного типа

Вид пористого хрома в разрезе показан на рис. 6. Глубина пористости в среднем равняется 1/3 всей толщины слоя.

При получении канальчатого типа пористости возможно применять: плотность тока 40—45 А/дм², температуру 50±2°С, продолжительность 9—12 мин. В зависимости от точности ведения электролиза при хромировании сетка трещин на поверхности

деталей может быть самой различной величины (рис. 7 и 8).

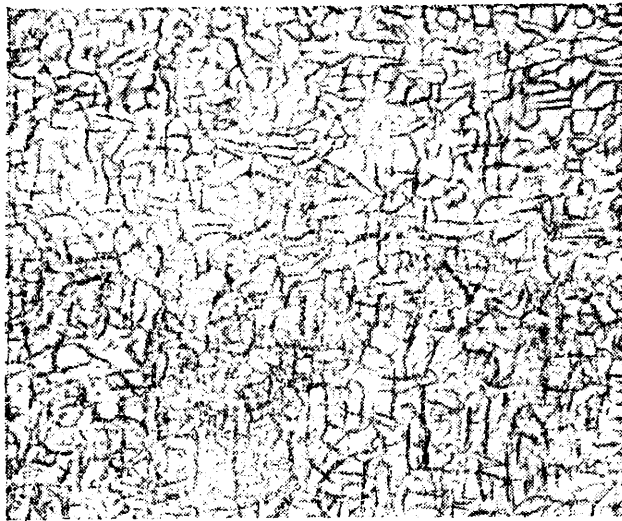


Рис. 7. Мелкая сетка трещин пористого хрома канальчатого типа

Наилучшей для эксплуатации является мелкая сетка трещин (рис. 7), имеющая размеры площадок между отдельными канальцами $0,2—0,6 \text{ мм}^2$. Глубина пористости достигает $0,07—0,1 \text{ мм}$, а иногда и более, в зависимости от толщины слоя хрома и продолжительности анодной обработки. С обработкой пористости внутренние напряжения в

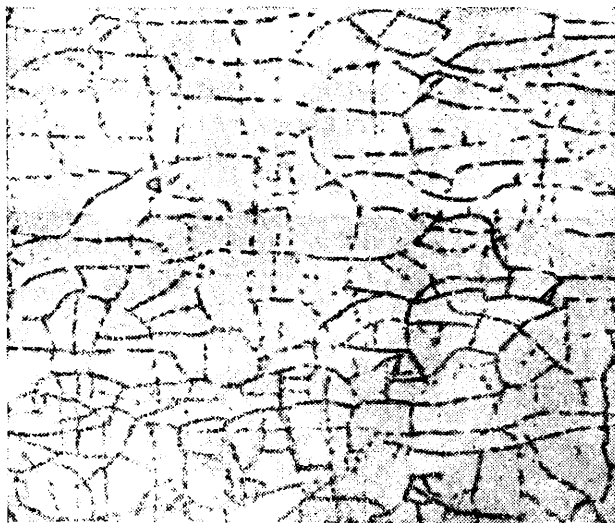


Рис. 8. Крупная сетка трещин пористого хрома канальчатого типа

хроме очень сильно снижаются и поэтому дополнительная термообработка хромированных деталей, широко применяемая при обычном хромировании, в данном случае исключается.

Пористая хромированная поверхность подвергается механической обработке: для канальчатого типа — хонингованием, для точечного типа — предварительной притиркой.

После анодной обработки на площадках между отдельными пересечениями линий сетки трещин образуется некоторая шероховатость хрома, которая может отрицательно влиять на работу сопряженных пар. Поэтому для создания ровной и гладкой поверхности применяется хонингование. Луч-

шая поверхность получается при двойной обработке при хонинговании: в начале — брусками крупной зернистости абразивов (250—325), а затем мелкой зернистости (400—600). Продолжительность процесса — 3—10 мин. Детали с пористым хромом точечного типа притираются на соответствующих установках и для некоторых из них возможно применение также и хонингования.

При механической обработке в поры хрома забивается много абразивов от брусков и частичек металлического хрома, снимаемых с поверхности. При эксплуатации изделий эти загрязнения могут вызывать задиры и тем создавать повышенный износ поверхности трущихся деталей.

Во избежание этого необходимо удалять все загрязнения, находящиеся в порах хрома. В цилиндрических деталях это осуществляется двух-трехкратной промывкой поверхности под давлением 5—6 ат. Струя жидкости (вода, или 5—10% раствор соды) подается равномерно по всей длине и окружности цилиндра. Для остальных деталей эту операцию рекомендуется вести в специальных моечных машинах.

Пористость хромовых покрытий на деталях определяется специальными контрольными (оптическими и фотоэлектрическими) приборами или по эталонам. Оптические приборы основаны на отображении пористости хрома на соответствующих экранах, по которому судят о пригодности размеров сетки трещин для эксплуатации деталей. Упрощенный ручной оптический прибор позволяет контролировать сетку трещин при увеличении в 2—5 раз.

В фотоэлектрическом приборе свет от электрической лампочки при помощи соответствующих линз передается на поверхность пористого хрома, откуда отражается на фотоэлемент, присоединенный к гальванометру. В зависимости от размера пористости стрелка гальванометра отклоняется и по показаниям шкалы определяется степень пористости. Предельные размеры наиболее эффективной пористости замеряются предварительно планиметрированием.

Простым и удобным методом контроля является сравнение с эталонными образцами. На основании исследовательских и экспериментальных работ определяется тип и степень пористости хрома и затем изготавливаются эталоны с максимальной и минимальной пористостью для данной детали. Все хромированные изделия сравниваются с эталонными образцами, после чего устанавливается их пригодность для эксплуатации. При часто повторяющихся отклонениях от заданной пористости необходимо произвести корректировку ванн хромирования.

На большом количестве деталей, работающих на трение, износу подвергается только поверхность с толщиной слоя не выше $1,0—1,5 \text{ мм}$. Для более точных изделий (например, авиационные двигатели внутреннего сгорания) эти данные еще меньше — $0,25—0,50 \text{ мм}$.

Таким образом, внедрение твердых пористых хромовых покрытий ставит вопрос о возможности изготавливать сплошные конструкции деталей не из высококачественных легированных сталей, а из простых поделочных. При этом необходимо соблюдать только конструктивную прочность деталей и наносить износоустойчивые хромовые покрытия.

Сушка дерева токами высокой частоты

Канд. техн. наук Я. В. НЕТУШИЛ

(Член Общества энергетиков)

Применение электрического тока для нагрева и сушки древесины давно привлекает внимание исследователей. При существующих камерных методах, когда материал нагревается от периферии к центру, процесс сушки весьма продолжителен, поверхностные слои древесины пересушиваются, а внутренние высушиваются недостаточно. Пересыхание (так называемая закалка) древесины на поверхности затрудняет выход водяных паров из внутренних участков, в результате чего появляются разрывы и трещины, дающие значительный процент брака.

При электрическом нагреве тепло выделяется непосредственно в сушимом материале и указанных недостатков уже не наблюдается. Нагрев материала по всему его сечению и движению тепла и влаги от центра к периферии значительно повышает скорость сушки и снижает брак производства.

Первые опыты по электрической сушке древесины были начаты во Франции еще в 1914 г. [1]. Однако примененные тогда токи промышленной частоты (20—30 герц) обрекли эксперимент на неудачу.

Как бы плотно электрод не прилегал к влажной древесине, всегда переходное сопротивление в месте их контакта приводило к перегреву и пересушиванию поверхностных слоев древесины. В результате высыхания поверхности практически прекращалось протекание тока и дальнейший нагрев материала.

Широкое развитие радиотехники позволило в 30-х годах нынешнего столетия возобновить эксперименты по электрической сушке древесины. Токи радиочастот для этой цели впервые применены в СССР в 1932—1934 гг. [1, 2, 7, 9]. Первые эксперименты были поставлены Ленинградским филиалом ЦНИИМОДа.

При токах коротковолнового диапазона (волна до 50 м) влияние воздушного промежутка между электродом и древесиной было исключено и процесс сушки малых образцов древесины шел быстро.

Сушка больших образцов однако хороших результатов не дала. Неравномерность нагрева, вызванная стоячими волнами, возникающими при высоких частотах (пестрая сушка), а также низкий к. п. д. генератора коротковолнового диапазона привели к выводу о нецелесообразности высокочастотной сушки больших образцов древесины и этот способ был применен только для малогабаритных, преимущественно березовых изделий (например на фабрике «Скороход» и на заводе им. Киркиж в г. Коврове).

Опыт ЦНИИМОД был перенят рядом иностранных лабораторий, которые довольно успешно проводили сушку малогабаритных образцов древесины в коротковолновом диапазоне. Однако до сих пор этот метод не получил за границей большого применения [2, 3, 4, 5, 6].

Одновременно с ЦНИИМОД аналогичные опыты начал Воронежский индустриально-строительный

институт (ВИСИ) [7] совместно с Научно-исследовательской лабораторией электрификации строительства (НИЛЭС) [8, 9, 10, 11, 13, 14]. Использовались токи средневолнового и длинноволнового диапазона.

Результаты сушки древесины в средневолновом диапазоне, полученные в НИЛЭС, позволили принять решение о внедрении этого метода в промышленном масштабе для крупных сортиментов леса. В настоящее время лабораторией НИЛЭС и по данным НИЛЭС спроектировано более 20 высокочастотных установок, из которых шесть уже эксплуатируются.

Применение высокочастотного нагрева позволяет коренным образом изменить технологию заготовки строительной и поделочной древесины. Сроки заготовки сокращаются в десятки и сотни раз при значительном повышении качества сушки. Пропитка древесины антисептирующими и огнестойкими веществами осуществляется параллельно с сушкой без специального сложного и громоздкого оборудования. Такие же вопросы, как качественная искусственная сушка древесины крупных сечений, частичная сушка и пропитка ее вообще возможны только при высокочастотном нагреве.

Основным требованием, несколько лимитирующим широкое внедрение этого метода, является необходимость в свободной электрической энергии: для сушки токами высокой частоты 1 м³ древесины, в зависимости от ее сортимента и влажности, расходуется от 250 до 350 кВт/ч энергии [8, 10, 11].

Именно поэтому внедрение высокочастотной сушки, в первую очередь, следует рекомендовать в районах с дешевой электроэнергией. При разработке схемы установки и выборе режима сушки надо уделять серьезное внимание расходу электроэнергии.

В зависимости от экономической целесообразности можно наметить следующие области применения высокочастотной сушки и пропитки древесины:

1) частичная сушка и пропитка опор линий передач, свай и частей портовых сооружений, подверженных поражению грибом и древоточцами;

2) качественная сушка брусьев крупных сечений (например вагонных брусьев и мостовых ферм);

3) сушка и пропитка ценных пород древесины;

4) сушка древесины, идущей для специальных поделок;

5) сушка и пропитка железнодорожных шпал;

6) сушка строительных пиломатериалов.

Наибольший эффект следует ожидать в первых пяти случаях. Так, например, при камерной сушке сердцевинного бруса больших сечений уже при конечной влажности 30% получается до 50% брака, а при влажности 22% брак составляет до 100%. С помощью же токов высокой частоты удается высушить древесину крупного сечения до влаж-

ности 12% при браке не более 5%. Продолжительность процесса при этом сокращается в 30—40 раз.

Сушка древесины

Нагрев древесины токами высокой частоты производится путем пропускания тока и выделения тепла непосредственно в обрабатываемом веществе. Генератор высокой частоты подключается к металлическим электродам, между которыми уложена древесина. Протекающий ток нагревает ее.

Для получения высококачественной продукции сушку необходимо вести в строго определенном режиме, зависящем от породы и сортамента древесины [10, 11]. Поддержание режима обеспечивается регулированием нагрева путем изменения напряжения на электродах, длины волны генератора, температуры и влажности воздуха в сушильном помещении. Это помещение обычно представляет собой камеру, внутренние стенки которой покрыты огнестойким составом. Камера оборудуется небольшой приточно-вытяжной вентиляционной установкой мощностью 2—3 квт. Древесина загружается в сушильную камеру на специальных тележках, передвигающихся по узкоколейному пути; остывает она либо в этой же камере, либо в специальной форкамере.

Электроды, между которыми укладывается древесина, бывают различной конструкции. Наибольшее распространение получили две из них: а) сетчатые горизонтальные и б) сетчатые вертикальные электроды.

Способы укладки древесины при электродах разной конструкции существенно различаются.

При горизонтальных сетчатых электродах лес загружается на тележку следующим образом: на настиле тележки раскатывается металлическая сетка (электрод), на эту сетку укладывается древесина (пиломатериалы кладутся рядами на расстоянии 2—3 см друг от друга), затем снова сетка, а на нее опять лес (рис. 8). Таким образом получается штабель. К сеткам подключается источник тока высокой частоты. Влага удаляется через вертикальные щели (продухи) между рядами древесины.

При сушке брусьев металлическая сетка укладывается через каждый ряд их, при сушке досок — через два—три ряда (в зависимости от толщины досок).

При электродах вертикальной конструкции (рис. 1) тележка с уложенной древесиной помещается между двумя электродными сетками, перемещающимися по контактам направляющим. Перед началом сушки сетки прижимаются к древесине или устанавливаются на некотором расстоянии от поверхности. Зазор между сеткой и древесиной устанавливается в соответствии с расчетом нагрузочного контура высокочастотного генератора.

Вертикальные электроды были применены в промышленном масштабе на Калининском вагоностроительном заводе и на строительстве Беломорско-Балтийского канала. Установка ББК, выполненная по проектному заданию НИЛЭС, описана без ссылки на эту организацию инж. Мондрусом [12].

При сушке твердых пород большое значение имеет создание влажной атмосферы вблизи поверхности древесины. Только при этих условиях удастся избежать трещин и свищей.

Для данной цели по предложению автора и Л. С. Левина, начинают применяться дренажные электроды, обшитые хлопчатобумажной тканью, в которой скапливается удаленная из древесины влага. Наряду с увлажнением поверхности древесины, такие электроды позволяют избавиться от искрения между своей поверхностью и древесиной в местах неоднородностей, и несколько сократить расход электроэнергии.

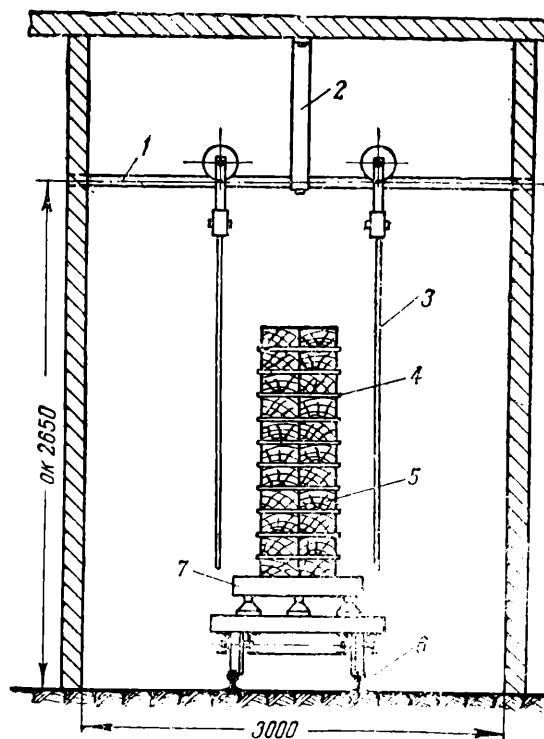


Рис. 1. Эскиз укладки древесины при вертикальных электродах:

1 — направляющая; 2 — подвеска; 3 — электрод; 4 — прокладка; 5 — штабель брусьев; 6 — узкоколейный путь; 7 — стенд

При сушке леса круглых сечений применяются горизонтальные электроды, охватывающие каждый ствол с двух сторон. Угол охвата зависит от породы дерева и соотношения между размерами ядра и заболони. С поверхности древесины предварительно удаляется луб и 1—2 годовичных слоя.

При применении токов высокой частоты (в отличие от камерной тепловой сушки) допускается частичная сушка древесины по длине для всех соответствующих сортиментов (предложение К. П. Семенского, П. В. Гужева и В. В. Попова) [10]. Технология при этом не меняется. Электроды накладываются только на места, подлежащие сушке. Вся остальная древесина не греется и не меняет своей влажности.

Частичная сушка используется при консервировании древесины путем пропитки ее антисептиками на ограниченном участке длины.

Пропитка древесины

Если древесина высушена токами высокой частоты до влажности 18—25% и в нагретом состоянии помещена в холодную жидкость (водный раствор или масло), то происходит интенсивное засасывание этой жидкости в поры. Такое явление объясняется

тем, что при нагреве и сушке древесины, протекающих при температуре от 85 до 110°C, оставшаяся в ее сосудах и клетках влага находится в парообразном состоянии. При охлаждении происходит конденсация пара, вследствие чего внутри древесины возникает повышенный вакуум.

При погружении в масляный антисептик горячей древесины сосны ее заболонная часть полностью пропитывается. Обнаженная ядровая древесина с боковых сторон пропитывается на глубину 4—5 мм, а с торцов до 5—6 см. При водных антисептиках древесина пропитывается почти полностью по всему поперечному сечению. Продолжительность процесса составляет от 1 до 5 час. в зависимости от заданной степени ограниченного поглощения антисептика.

После выемки из вани пропитанной древесины, находящейся на ее поверхности слой жидкости всасывается внутрь и поверхность оказывается сухой. Это позволяет покрывать древесину гидроизоляционными составами, что весьма ценно, когда нужно предохранить ее от последующего увлажнения и выщелачивания антисептика.

Покрытие гидроизоляционными составами производится сразу же после пропитки антисептиком, путем погружения древесины в открытую ванну. Глубина пропитывания этих составов составляет 2—3 мм.

Для оборудования пропиточной установки необходимы: 1) открытые деревянные или железные ванны; 2) сборники для хранения антисептиков и 3) насосы для их перекачки. Антисептики подогреваются до 25—30°C.

Простота оборудования и высокое качество пропитки токами высокой частоты ставят этот метод в преимущественное положение по сравнению с наиболее совершенным сейчас способом Рюпинга.

Электрические характеристики древесины

При внесении древесины в электрическое поле высокой частоты в материале возникает электрический ток, на плотность которого влияют напряженность поля и некоторые физические константы, зависящие от структурных особенностей материала, влажности, температуры древесины и частоты тока.

Структура древесины чрезвычайно сложна. Наряду с кристаллическими веществами, клетки ее содержат большое количество влаги. Строение клеток резко анизотропно, т. е. они имеют неодинаковые физические свойства в разных направлениях. Структура разных частей древесины (например, ядра и заболони весенних и летних частей годичного кольца), в свою очередь, существенно различается. Радиальные лучи и сучки еще больше повышают неоднородность.

Вследствие всего этого характеристики древесины оказываются различными в направлениях: 1) параллельном волокну, 2) радиальном и 3) тангентальном.

Поскольку обычно древесина укладывается между электродами так, что электрическое поле направлено перпендикулярно волокну, для изучения поля в древесине необходимо знать ее характеристики во всех направлениях, перпендикулярных волокну. Практически при расчете приходится иметь дело со средними значениями напряженностей и плотностей токов в древесине, для которых и надо

установить усредненные электрические характеристики.

Согласно закону Ома для полей переменного тока в любой точке материала может быть установлена следующая зависимость между напряженностью поля $\vec{E}$ и плотностью тока $\vec{j}$:

$$\vec{E} = z_v \vec{j} \text{ или } \vec{j} = y_v \vec{E}, \quad (1)$$

где z_v и y_v средние значения комплексных величин удельного сопротивления и удельной проводимости древесины, характеризующие ее электрические свойства.

$$z_v = \frac{1}{y_v}.$$

Если комплексную удельную проводимость записать в виде вещественной и мнимой части

$$y_v = g_v + jb_v,$$

то мнимая часть b_v характеризует величину емкостного тока, опережающего напряжения на 90°, а вещественная часть g_v характеризует активный ток потерь в материале.

Как известно, эти потери могут быть представлены в виде двух составляющих: а) потерь от сквозного тока и б) абсорбционных потерь [15]. Первые определяются током проводимости и принципиально не зависят от частоты. Вторые зависят от неоднородности структуры материала, молекулярного трения, происходящего при ориентации молекул жидких материалов в электрическом поле, и от высоковольтной поляризации в твердых диэлектриках.

При неизменной напряженности поля потери от сквозного тока характеризуются проводимостью материала γ , абсорбционные потери — фактором потерь ϵ'' , а емкостный ток — диэлектрическим коэффициентом ϵ . Комплексная удельная проводимость может быть представлена в виде:

$$y_v = g_v + jb_v = \gamma + \omega\epsilon'' - j\omega\epsilon = \gamma + j\omega(\epsilon - j\epsilon''),$$

откуда

$$g_v = \gamma + \omega\epsilon'',$$

а

$$b_v = \omega\epsilon. \quad (2)$$

В диэлектриках, где $\gamma = 0$, комплексная проводимость характеризуется только комплексным диэлектрическим коэффициентом ϵ^* или диэлектрическим коэффициентом и углом потерь ϵ и $\text{tg } \delta$

$$\epsilon^* = \epsilon - j\epsilon'' = \epsilon(1 - j \text{tg } \delta)$$

и

$$y_v = j\omega\epsilon^* = \omega\epsilon'' + j\omega\epsilon = \omega\epsilon(\text{tg } \delta + j).$$

Часто для расчета схемы важно знать не комплексную удельную проводимость материала, а функционально с ней связанное комплексное удельное сопротивление:

$$z_v = \frac{1}{y_v} = r_v - jx_v.$$

Переход от удельной комплексной проводимости к сопротивлению производится согласно формулам:

$$r_v = \frac{g_v}{|y_v|^2} = \frac{g_v}{g_v^2 + b_v^2}; \quad x_v = \frac{b_v}{|y_v|^2} = \frac{b_v}{g_v^2 + b_v^2}, \quad (3)$$

а обратно по формулам:

$$g_v = \frac{r_v}{|z_v|^2} = \frac{r_v}{r_v^2 + x_v^2}; \quad b_v = \frac{x_v}{|z_v|^2} = \frac{x_v}{r_v^2 + x_v^2}. \quad (4)$$

Угол потерь δ древесины определяется по формуле:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{r_r}{x_r} = \frac{g_r}{b_r}. \quad (5)$$

В зависимости от рода потерь, преобладающих в древесине, изменение $\operatorname{tg} \delta$ от частоты носит различный характер. Типичный график такого изменения представлен на рис. 2.

При частоте меньше f_1 основным видом потерь являются потери проводимости и, следовательно, на этом участке характеристики $\operatorname{tg} \delta$ изменяются по гиперболическому закону, уменьшаясь с ростом частоты. При частотах средневолнового диапазона $\operatorname{tg} \delta$ влажной древесины может достигать величин, измеряемых единицами.

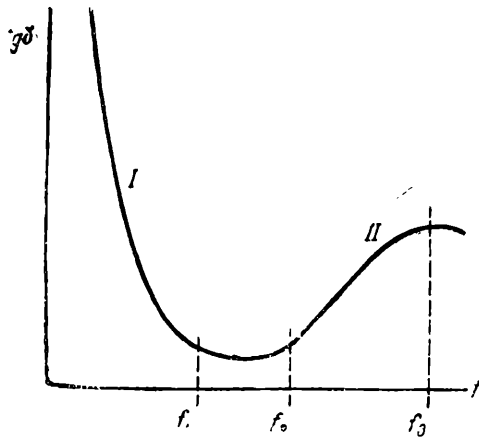


Рис. 2. Характерный график изменения $\operatorname{tg} \delta$ влажного материала от частоты

При частоте больше f_1 начинают сказываться абсорбционные потери, которые в известном диапазоне частот компенсируют уменьшение $\operatorname{tg} \delta$ за счет потерь проводимости. В некотором диапазоне, ограниченном частотами f_1 и f_2 , $\operatorname{tg} \delta$ примерно остается постоянным.

При частотах больше f_2 абсорбционные потери преобладают и угол потерь увеличивается с ростом частоты [15], достигая при некоторой частоте f_3 своего максимума.

Сушка древесины в средневолновом диапазоне частот обычно происходит за счет потерь проводимости и, следовательно, приходится пользоваться первой ветвью кривой $f < f_1$. В коротковолновом диапазоне частот, напротив, решающее значение имеют абсорбционные потери и $\operatorname{tg} \delta$ с увеличением частоты возрастает [3] (см. участок кривой $f_2 < f < f_3$).

С изменением влажности древесины сильно меняются ее электрические характеристики.

На рис. 3 и 4 представлены зависимости составляющих проводимости березы и ели от влажности при температуре 100°C . Кривые получены для частоты 250 кГц или, иначе, для волны $\lambda = 1200 \text{ м}$.

При малых влажностях реактивная проводимость b_r оказывается меньше активной g_r , тогда как при больших влажностях, наоборот, активная проводимость настолько возрастает, что $\operatorname{tg} \delta$ начинает превышать единицу.

Для березы как активная, так и реактивная проводимость значительно выше, чем для ели.

Приведенные кривые получены на основании усредненных данных многочисленных эксперимен-

тов, проведенных инж. А. Б. Шистер. Вследствие неоднородности структуры древесины отдельные измерения дают довольно большие расхождения со средними значениями, причем наибольший разброс точек до $\pm 70\%$ наблюдается в величинах активной проводимости хвойных пород (рис. 3 и 4).

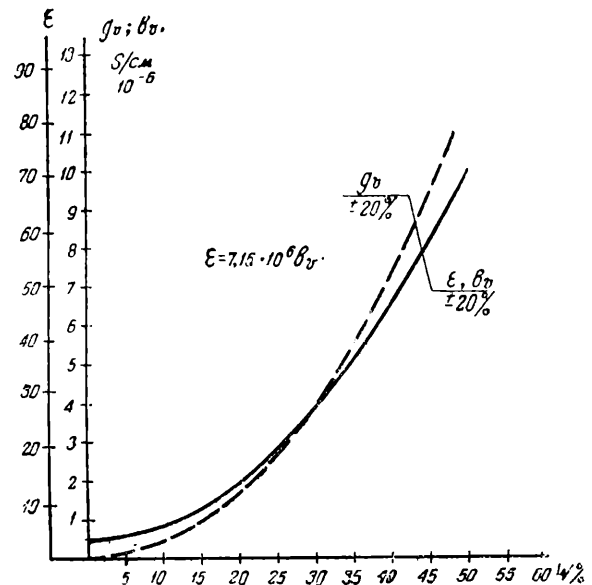


Рис. 3. Зависимость средних значений ϵ , g_v и b_v березы от влажности при температуре $t = 100^\circ\text{C}$ и длине волны $\lambda = 1200 \text{ м}$

При расчете мощности, отдаваемой генератором, существенно знать изменение активного и реактивного удельных сопротивлений нагрузки, определяемых по формулам (3) и (4). Для характеристик ели, представленных на рис. 4, подсчитаны и построены значения удельных сопротивлений (см. кривые 1 и 2, рис. 5).

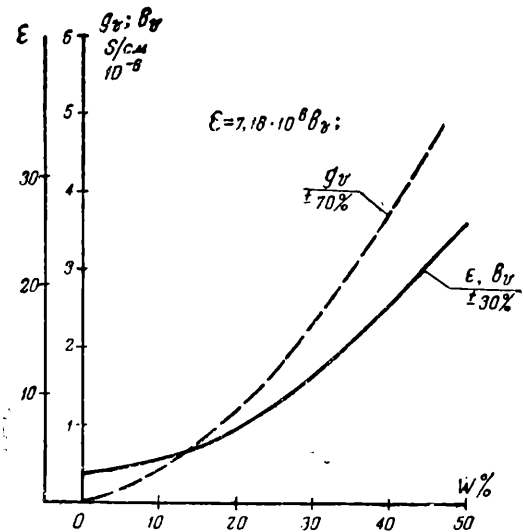


Рис. 4. Зависимость средних значений ϵ , g_v и b_v ели от влажности при температуре $t = 100^\circ\text{C}$ и длине волны $\lambda = 1200 \text{ м}$

Так как мнимая составляющая комплексного сопротивления древесины всегда может быть компенсирована индуктивностью вариометра нагрузочного контура генератора, то практически режим работы генератора определяется величиной действительной составляющей комплексного сопротивления r_r .

Из кривой 2 видно, что зависимость r_v от влажности имеет резко очерченный максимум, наступающий при влажности древесины 5—10%. Так как сушка обычно проводится при влажностях больше 10%, то практически приходится иметь дело с монотонно убывающей ветвью кривой

$$r_v = f(w).$$

Если допустить, что в данном диапазоне частот ε и g_v не зависят от частоты, то по кривым рис. 4 могут быть построены значения x_v и r_v для других

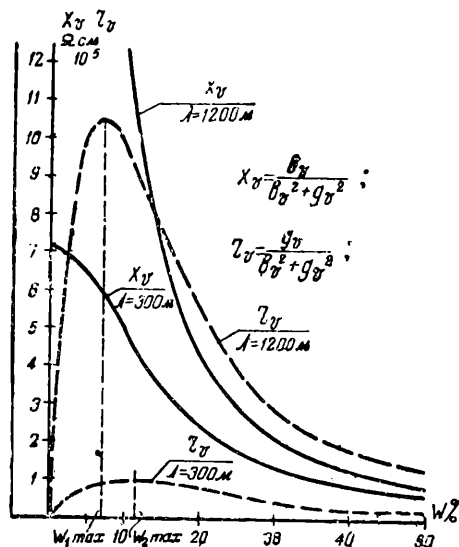


Рис. 5. Зависимость средних значений x_v и r_v от влажности, построенные согласно кривым рис. 4

случаев. Так, на рис. 5 (кривые 3 и 4) построены x_v и r_v для частоты 10^6 циклов или $\lambda = 300$ м. Как видно, с ростом частоты максимум кривой r_v несколько смещается в сторону больших влажностей при значительном снижении его абсолютной величины.

По известным характеристикам древесины сопротивление штабеля может быть подсчитано по формулам:

$$Z = z_v \frac{d}{s},$$

а

$$Y = y_v \frac{s}{d}, \quad (6)$$

где d — расстояние между электродами, s — сечение материала перпендикулярно направлению тока.

При подсчете общего сопротивления обязательно надо также учитывать переходное сопротивление между электродами и древесиной [14].

Генераторы высокой частоты для сушки древесины

Требования, предъявляемые к генераторам высокой частоты для сушки древесины, отличаются от требований к генераторам, применяемым в электросвязи и в электрометаллургии.

Основным требованием к генератору для сушки древесины является возможность строгого поддержания необходимого теплового режима. Поскольку же во время сушки характеристики нагрузки сильно изменяются, то соблюдение заданного режима при сохранении высокого к. п. д. генератора оказы-

вается чрезвычайно затруднительным. Именно поэтому невозможен универсальный высокочастотный генератор, обеспечивающий любой режим сушки любых сортиментов и пород древесины.

Для различных назначений применяются разные генераторы или, по крайней мере, их нагрузочные контуры, рассчитываемые и настраиваемые в соответствии с режимом сушки и параметрами древесины. В настоящее время приняты две схемы генераторов: а) с нагрузкой в колебательном контуре (рис. 6) и б) с промежуточным колебательным контуром (рис. 7). В обоих случаях генераторы с самовозбуждением работают, как правило, в режиме колебаний 2-го рода.

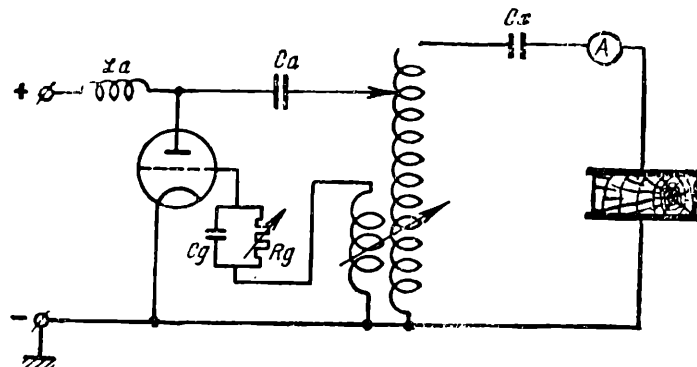


Рис. 6. Схема генератора с нагрузкой в колебательном контуре

Режим нагрева и к. п. д. генератора в первой схеме регулируется путем перестановки щупа анодной связи и изменением обратной связи на сетку. Конструктивные трудности изменений анодной связи под нагрузкой приводят к необходимости отключения генератора для перестановки щупа анодной связи.

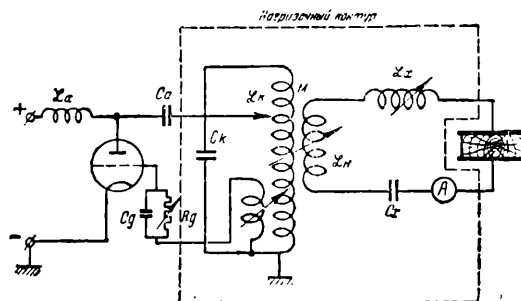


Рис. 7. Схема генератора с промежуточным колебательным контуром

Этим недостатком не обладает вторая схема, в которой имеется возможность регулирования в процессе работы генератора не только обратной связи на сетку, но и связи с нагрузкой. Режим нагрева древесины может строго регулироваться в процессе сушки путем изменения связи с нагрузкой. Наличие двух контуров при связи между ними выше критической приводит к появлению двуволности, когда генератор может самопроизвольно, скачком изменять волну. Плавным непрерывным регулированием резонанса в нагрузочном контуре, что достигается вариометром L_x и конденсатором C_x , такие изменения волны исключаются.

Схема б более гибка в эксплуатации, однако требует большего количества дефицитных конден-

саторов. В ряде случаев можно идти на упрощение схемы и переход к варианту схемы а, когда за счет некоторого затруднения регулировки значительно упрощается схема контура и уменьшаются затраты дефицитного оборудования (предложение инж. Мазнина А. Н.) [12]. Схема а в настоящее время находится в стадии экспериментальной доработки. О возможности соблюдения любых режимов сушки при этой схеме окончательных выводов сделать еще нельзя.

Высокочастотные генераторы для сушки древесины состоят из четырех основных частей (рис. 8): а) силового щита с вынесенным отдельно анодным трансформатором, б) газотронного выпрямителя, в) генераторных ламп и г) колебательного контура.

Неравномерности нагрева древесины

Как мы уже указывали, по своей природе древесина резко неоднородна. Поэтому при ее сушке в поле токов высокой частоты возможны явления неравномерного нагрева, вызванные структурными особенностями материала. К таким явлениям относятся перегрев и искрение в местах сучков, различный нагрев заболонных и ядровых участков, неравномерная сушка последовательно включаемых образцов и т. п.

Различный нагрев участков древесины с разной влажностью был подмечен инж. К. П. Семенским и назван термоселективным эффектом.

Рассмотрим простейшие примеры неоднородной нагрузки и произведем качественную оценку темпе-

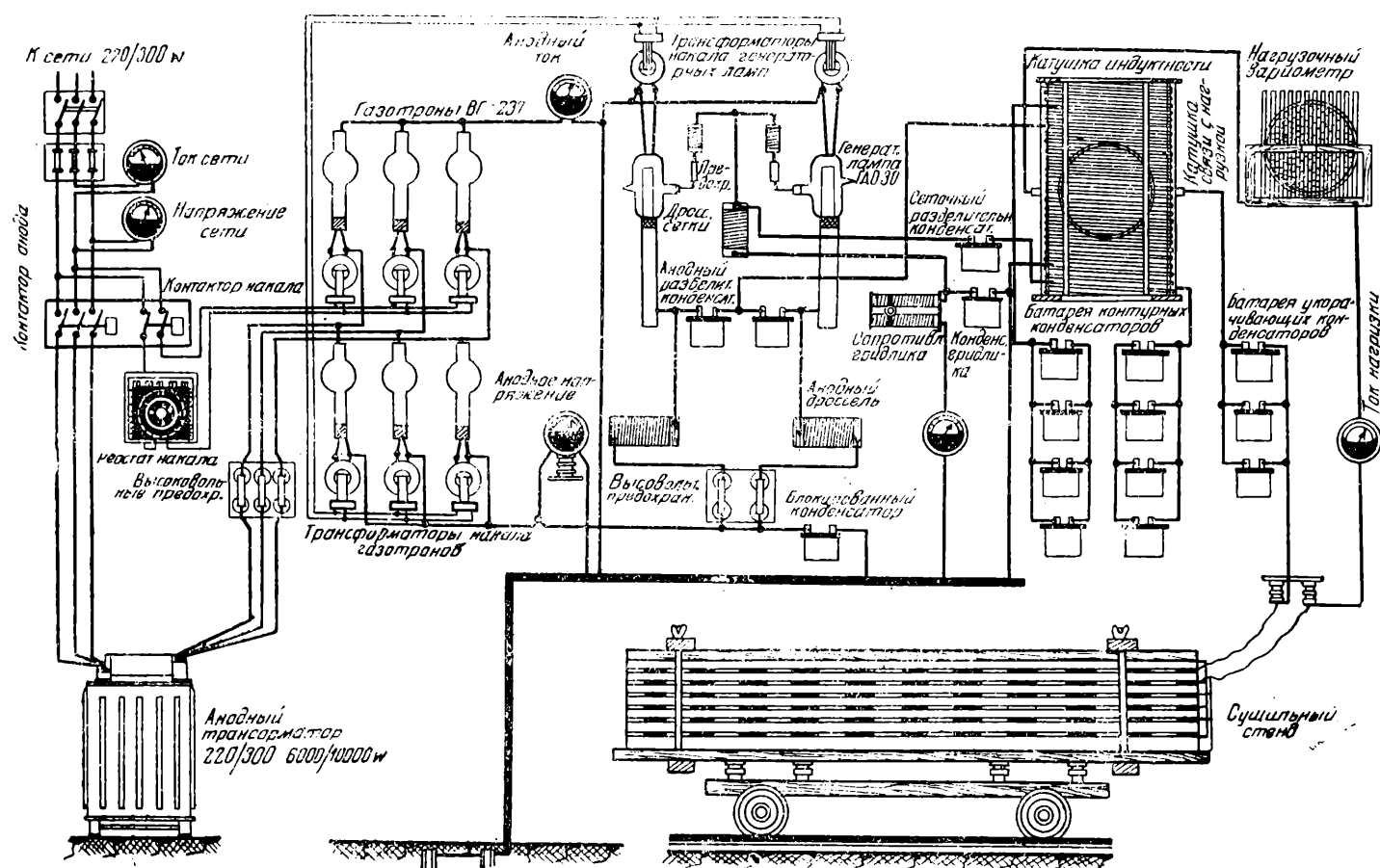


Рис. 8. Схема высокочастотной установки для сушки древесины

В зависимости от компоновки этих частей генераторы бывают щитовые и шкафовые. В щитовой конструкции все четыре основных панели расположены вдоль фасада генератора и представляют собой один сплошной щит (рис. 9). При шкафовой конструкции первые три панели размещаются в одном шкафу, а колебательный контур выносится отдельно. При этом для размещения генератора требуется несколько меньшая площадь.

Укажем установки полезной мощностью 10 и 50 кВт, нашедшие практическое применение. Данные этих установок приведены в табл. 1.

Основным оборудованием 50-киловаттного генератора является генератор завода им. Ворошилова (Москва). В равной степени применимы сушильные и закалочные агрегаты. Нагрузочный контур изготавливается дополнительно (по схеме рис. 7), по проекту НИЛЭС.

Таблица 1

Технические показатели установки	Генератор 10 кВт	Генератор 50 кВт
Наибольшая высокочастотная мощность, кВт	10	50
Мощность анодного трансформатора, кВа	20	84
Тип и количество генераторных ламп	4 шт. 1К-3000	2 шт. ГДО-30
Частота, кгц	330—1000	330—1000
Промышленный к. п. д.	0,46	0,55
Едновременная загрузка генератора, м³	0,4	2
Суточная производительность, м³	1,2	4—6
Конструкция	Щитовая	Шкафная

ратурного режима в различных ее частях. Пусть между электродами высокочастотного генератора с

напряжением U последовательно включены два образца древесины с разной влажностью w_1 и w_2 (рис. 10) и характеристиками r_{v1} , r_{v2} , x_{v1} и x_{v2} . С помощью вариометра и укорачивающего конденсатора в нагрузочном контуре поддерживается резонанс

большой влажности. Кроме того, повышение частоты при том же напряжении генератора значительно повышает интенсивность нагрева за счет уменьшения величины r_v (рис. 5 и формула [7]).

Как показывают эксперименты, значительное

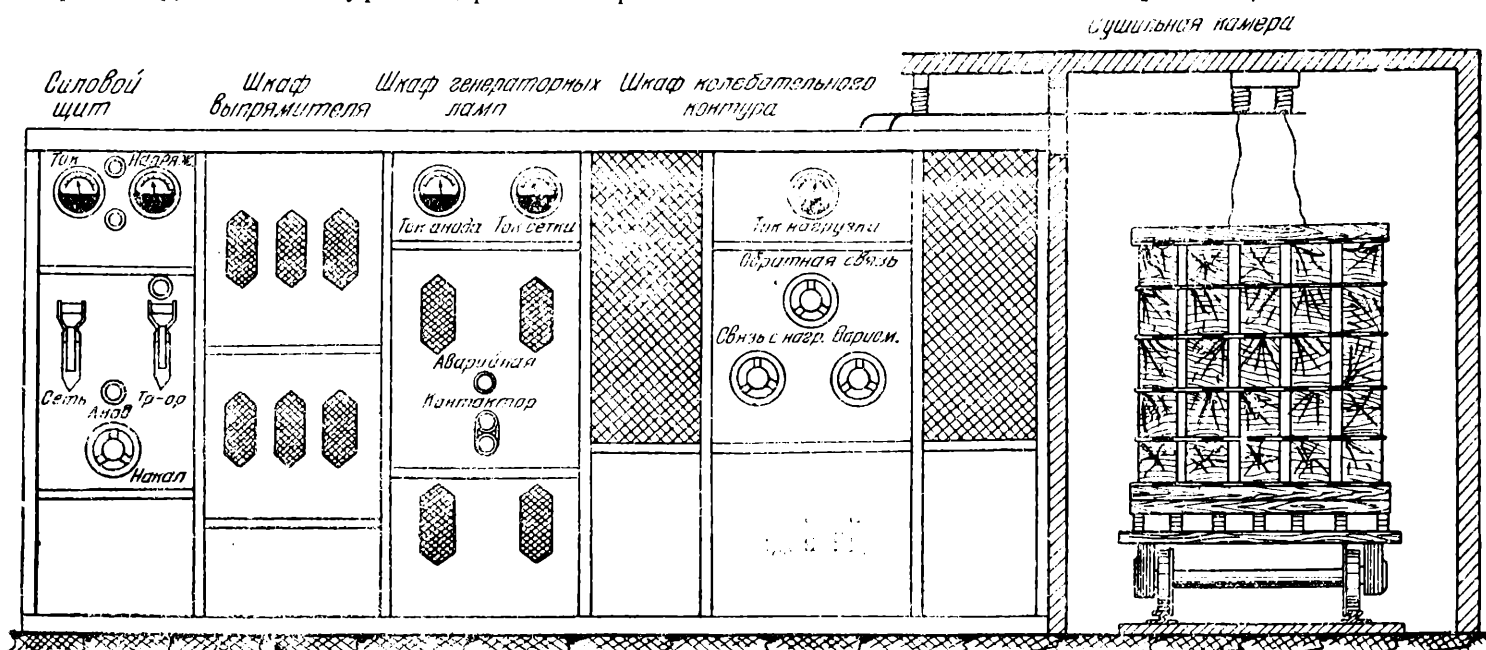


Рис. 9. Общий вид высокочастотной установки для сушки древесины

напряжений, при котором индуктивные и емкостные сопротивления взаимно компенсируются. Тогда ток через нагрузку, определяемый только ее активным сопротивлением, равен

$$I = \frac{Us}{r_{v1}d_1 + r_{v2}d_2}$$

Плотность тока равномерна по сечению обоих образцов:

$$J = \frac{I}{s} = \frac{U}{r_{v1}d_1 + r_{v2}d_2}$$

Мощность, выделяемая в единице объема, характеризует интенсивность нагрева древесины и равна

$$\left. \begin{aligned} p_{v1} &= J^2 r_{v1} = \frac{U^2 r_{v1}}{(r_{v1}d_1 + r_{v2}d_2)^2} \\ p_{v2} &= J^2 r_{v2} = \frac{U^2 r_{v2}}{(r_{v1}d_1 + r_{v2}d_2)^2} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

для второго.

Сопоставляя полученные выражения и учитывая график изменения r_v от влажности (рис. 5), нетрудно сделать следующие выводы. При влажностях обоих образцов, больших $w_{\max}$ (соответствует максимуму r_v), древесина с меньшей влажностью нагревается интенсивнее. По достижении влажности $w_{\max}$ мощность, выделяемая в этой древесине, начнет снижаться, тогда как мощность, выделяемая в более влажной древесине, возрастает. При некоторой влажности, меньшей $w_{\max}$, наступает равенство мощностей, после чего более влажная древесина начинает нагреваться интенсивнее. Такая неравномерность нагрева усугубляется различием теплёмкостей образцов.

С повышением частоты увеличивается $w_{\max}$ и, следовательно, равновесие мощностей наступает при

повышении частоты приводит к более интенсивному нагреву более влажной древесины. Это соответствует режиму сушки на начальном участке кривой $r_v = f(w)$ при смещении ее максимума в область больших влажностей.

Емкость воздушного зазора между древесиной и электродом в данном случае компенсируется индуктивностью вариометра и существенного влияния не оказывает.

Иное дело при параллельном включении двух различных образцов (рис. 11). В этом случае плотность тока в них оказывается разной и зависит от величины воздушного зазора.



Рис. 10. Эскиз последовательного включения двух образцов древесины

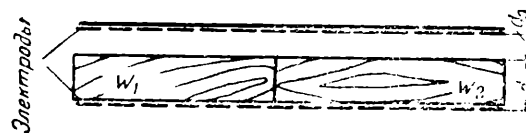


Рис. 11. Эскиз параллельного включения двух образцов древесины

Если пренебречь искажением поля в месте стыка двух образцов, то плотность тока в первом образце будет:

$$J_1 = \frac{U_a}{\sqrt{(x_{v0}d_0 + x_{v1}d)^2 + (r_{v1}d)^2}}$$

а во втором

$$J_2 = \frac{U_a}{\sqrt{(x_{v0}d_0 + x_{v2}d)^2 + (r_{v2}d)^2}},$$

где U_a — напряжение между электродами, $x_v = \frac{1}{\omega \varepsilon_0}$ — удельное реактивное сопротивление воздуха.

Тогда мощность, выделяемая в единице объема для первого образца, будет:

$$\left. \begin{aligned} p_{v1} &= J_1^2 r_{v1} = \frac{U_a^2 r_{v1}}{(x_{v0}d_0 + x_{v1}d)^2 + (r_{v1}d)^2}, \\ p_{v2} &= J_2^2 r_{v2} = \frac{U_a^2 r_{v2}}{(x_{v0}d_0 + x_{v2}d)^2 + (r_{v2}d)^2} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Так как x_{v0} значительно больше x_{v1} и x_{v2} , то при наличии большого воздушного зазора мощности оказываются пропорциональными активным удельным сопротивлениям и имеет место такая же неравномерность нагрева, как и в случае параллельного включения образцов. При уменьшении воздушного зазора эта неравномерность сглаживается и при $d_0 = 0$ выражение (8) приобретает следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} p_{v1} &= \frac{U_a^2 r_{v1}}{d^2 (x_{v1}^2 + r_{v1}^2)} = \frac{U_a^2 g_{v1}}{d^2}; \\ p_{v2} &= \frac{U_a^2 r_{v2}}{d^2 (x_{v2}^2 + r_{v2}^2)} = \frac{U_a^2 g_{v2}}{d^2} \end{aligned} \right\} \quad (8a)$$

Итак, при отсутствии воздушного зазора мощность, выделяемая в единице объема параллельно включенных образцов древесины, пропорциональна активной проводимости этих образцов.

Так как более влажная древесина обладает большей активной проводимостью, то она и нагревается интенсивнее.

Резюмируя, можно сделать следующие выводы:

1. Введение воздушного зазора между электродами и древесиной, не оказывая влияния на последовательно включенные образцы, приводит к перераспределению удельных мощностей параллельно включенных образцов, перевода нагрузки с более влажного образца на менее влажный. С этой точки зрения следует избегать значительных воздушных зазоров между древесиной и электродами.

2. Повышение частоты тока наряду с увеличением интенсивности нагрева содействует более правильному распределению мощностей между образцами различной влажности. Однако повышение частоты несколько снижает к. п. д. генератора и поэтому нежелательно. Кроме того, с увеличением частоты начинают сказываться неравномерности электрического поля в древесине, вызываемые стоячими волнами. Если также учесть, что значительная интенсификация процесса сушки и древесины ухудшает ее механические свойства, то для сушки крупномерного леса рекомендуется ограничиваться диапазоном волн в пределах 300 — 1 200 м.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. С. Селюгин, С. Н. Абраменко и др., Сушка и нагрев древесины в поле высокой частоты. Гослестехиздат, Ленинград, 1938.
2. E. Mittleman and I. L. Stephan, „Wood Products“, v. 46, X, 1941.
3. Taylor, Transactions of the A. S. M. E., v. 65, № 3, 1943.
4. Siemens-Schuckertwerke, Patentschrift, № 693972, Kl. 82-a, Gr. 101, 1940, 22/VII.
5. Siemens-Schuckertwerke, Patentschrift, № 688458, Kl. 82-a, Gr. 101, 1941, 22/II.
6. E. Santer, Patentschrift № 6989464, Kl. 82-a, Gr. 101, 1940, 20/8.
7. Б. Т. Ив., «Строительная промышленность», № 13—14, 1937.
8. Л. С. Левин, В. Н. Попов, В. М. Попов, «Строительная промышленность», № 9, 1945.
9. А. Н. Мазнин, «Радиофронт», № 4, 1941.
10. К. П. Семенский, «Промышленная энергетика», № 11—12, 1946.
11. «Сборник руководящих указаний и консультаций по строительству», № 3, 1946.
12. Мондрус, «Электротермия», № 3, 1946.
13. И. Б. Жури, «Электротехника в строительстве», иллюстрированное приложение к «Строительной газете», № 2 (114), 1941.
14. А. В. Нетушил, Сушка и пропитка древесины при помощи токов высокой частоты. «Консультационный материал ИТЭИН» Госплана СССР, 1947.
15. А. Ф. Вальтер, А. П. Александров и др., Физика диэлектриков, ГТТИ, 1932.

Простейшие теплотехнические расчеты для размораживания грунтов при зимних работах

Проф. В. Д. МАЧИНСКИЙ

(Член Общества теплоснабжения, отопления и вентиляции)

Размораживание грунта — сложный физический процесс, в котором чисто тепловые явления сочетаются с изменением агрегатного состояния почвенной влаги и, следовательно, с поглощением «скрытой» теплоты. Расчет размораживания в прямом виде (т. е. с точным учетом обоих явлений для каждого момента времени) очень сложен даже для простейших случаев и совершенно неудобен для инженерной практики¹. Для ряда других случаев он, как будет указано ниже, совсем не дается математической физикой.

Для нашего строительства в условиях зимы представляют интерес простейшие приближенные расчеты размораживания почвы для разных методов прогрева. Прежде чем перейти к отдельным расчетам, рассмотрим один общий для них вопрос.

Сложный процесс размораживания почвы можно свести к чисто тепловому процессу, если скрытую теплоту размораживания выразить в виде некоторой добавочной теплоемкости грунта. Подсчитав скрытую теплоту заданного мерзлого грунта в ккал на единицу его веса (кг) и разделив это количество на весь диапазон температур, в котором прогревается грунт, получим искомую добавочную теплоемкость его и присоединим ее к реальной теплоемкости. При практических вычислениях этот прием может давать результаты, отклоняющиеся от реальных лишь в промежуточных стадиях прогрева (поскольку прогревается не только мерзлый, но в известной стадии и талый грунт). В конечном же подсчете расхождений не будет. Так как для практики имеет значение только этот конечный результат, то законность данного приема не подлежит сомнению.

Таким образом, расчеты сводятся к чисто тепловым, но лишь с условно повышенной теплоемкостью c_y материала или с повышенным коэффициентом его температуропроводности

$$a = \frac{\lambda}{c_y \gamma},$$

где λ — теплопроводность, γ — вес 1 м³.

Для простейшего определения величины c_y может служить следующее элементарное уравнение, понятное без доказательства:

$$c_y(t_k - t_n) = (1 - \epsilon)c_i(t_k - t_n) + \epsilon(t_k - 0) + m\epsilon \cdot 80 + m\epsilon(t_n - 0) + m\epsilon c_a(t_n - 0), \quad (1)$$

где

t_n и t_k — соответствующие начальная и конечная температуры грунта,

ϵ — весовая доля влажности в 1 кг грунта, m — доля замерзающей влаги из общего ее коли-

чества в грунте² (т. е. без пленочной и гигроскопической),

индексы i и a — индексы «грунта» и «льда»,

80 — скрытая теплота плавления льда ккал/кг.

Из уравнения (1) имеем:

$$c_y = (1 - \epsilon)c_i + \frac{\epsilon \cdot t_k + m\epsilon(80 + t_n + c_a \cdot t_n)}{t_k - t_n} \quad (2)$$

или с упрощением:

$$c_y = (1 - \epsilon)c_i + \epsilon + \frac{80 m\epsilon}{t_k - t_n}. \quad (3)$$

Приведем числовой пример. Пусть весовая влажность грунта 20% ($\epsilon = 0,2$), $\lambda = 2,0$, $\gamma = 1800$ кг, $c_i = 0,20$ м = 0,5, средняя начальная температура³ $t_n = 0^\circ\text{C}$ и конечная $+7^\circ\text{C}$.

Имеем по формуле (2):

$$c_y = (1 - 0,2) \cdot 0,2 + \frac{0,2 \cdot 7 + 0,5 \cdot 0,2(80 + 0 + 0,5 \cdot 0)}{7,0} = 1,5$$

и

$$a_y = \frac{2,0}{1,5 \cdot 1800} = 0,0008.$$

Переходим к расчету отдельных случаев размораживания грунта.

Плоскостной прогрев грунта сверху

Примером его может служить электропрогрев грунта от слоя древесных опилок, насыпанных по поверхности отогреваемого грунта. В опилках проложена металлическая сетка сопротивлений току, а над ними расположен тесовый настил и таль. В слое опилок создается определенная постоянная температура, например, 50°C . В центре площадки, где влияние краевых условий наименьшее, можно полагать прогрев одинаковым с тем, что было бы при площадке бесконечного протяжения. В таком случае применим расчет прогрева почвы по функции с «интегралом ошибок» Гаусса, для которой имеется готовый график (рис. 1)⁴.

Функция построена по параметру $\frac{x}{2\sqrt{\tau a}}$, где x — глубина уровня искомой температуры грунта, τ — время прогрева в часах от начала его, считая такое же от момента установления заданной температуры в прогревающем слое⁵. По оси абсцисс указанной кривой отложены значения этого параметра, а по оси ординат — соответствующие зна-

² По предварительным данным б. Гипрооргстроя $m = 0,5$.

³ Если температура отрицательна, то обычно принимают ее за 0° и соответственно увеличивают значение t_k .

⁴ См., например, Шапкин, «Теплопередача в промывающих», нем. изд. 1929, стр. 38.

⁵ В теории предполагается «внезапное» появление этой заданной температуры на поверхности почвы.

¹ Такой пример дан проф. Гребером для одного частного простейшего случая в книге «Основы учения о теплообмене».

чения самой функции f . Расчет температур, создающихся на любой глубине x_m и в любое время τ час, производится по формуле:

$$\Delta t_k = \Delta t_n \cdot f,$$

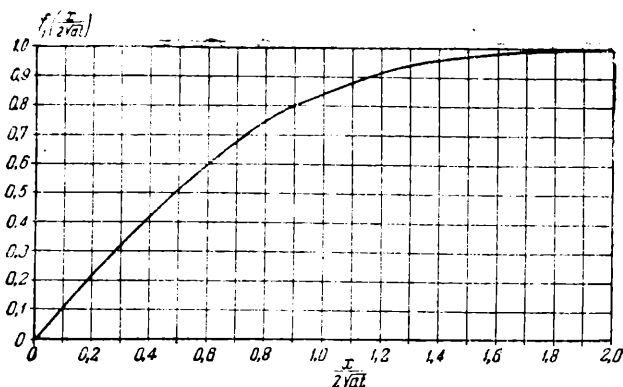


Рис. 1

где Δt_k и Δt_n — конечный и начальный перепады температур между нагревающим слоем и почвой. Вычислив по заданным параметрам и найдя по графику соответствующую величину функции f , мы получим Δt_k .

Здесь Δt_n определяется самими заданиями (начальной температуры грунта и предполагаемой температуры прогревающего слоя). Следовательно, найдем Δt_k , а затем и самую температуру грунта.

Приведем пример. Пусть начальная средняя температура грунта — 2° , температура прогревающего слоя 40°C , следовательно, $\Delta t_n = 42^\circ$. Влажность грунта пусть дана в 20% весовых, $m = 0,5$, $\gamma = 1800 \text{ кг}$, $c = 0,20$, $\lambda = 2,0$.

Найдем температуру грунта на глубине 1 м через 100 часов после начала прогрева.

Размороженная часть почвенного массива имеет температуру около прогревателя 40°C , а на границе размораживания — 0° . Средняя температура этого массива может быть принята, при параболической кривой температур, равной $1/3$, от 40° , т. е. $13,3^\circ\text{C}$. Следовательно, указанный массив имел диапазон нагрева от -2° до $+13,3^\circ$ — в $15,3^\circ\text{C}$. Поэтому его условная теплоемкость будет по формуле (3):

$$c_v = (1 - 0,2)0,20 + 0,20 + \frac{80 \cdot 0,10}{15,3} = 0,88$$

и

$$a = \frac{2,0}{0,88 \cdot 1800} = 0,00125.$$

Параметр

$$\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} = \frac{1,0}{2\sqrt{0,00125 \cdot 100}} = 1,4.$$

Этому значению параметра соответствует по кривой рис. 1 значение $f = 0,95$. Следовательно, $\Delta t_k = \Delta t_n \cdot 0,95 = 42 \cdot 0,95 = 39,9^\circ$. Этот перепад температур прогревателя и грунта на заданной глубине означает, что искомая температура последней через 100 часов составляет $40 - 39,9 = +0,1^\circ$ вместо начальных $-2,0$.

Прогрев грунта закрытыми вертикальными «иглами» с циркулирующим в них теплоносителем

Ввиду отсутствия в математической физике готового решения этого вопроса, приводим выработанный нами метод¹.

Введем следующие обозначения:

d_0 — диаметр иглы, м,

d_1, d_2 — диаметры средин цилиндрических слоев грунта вокруг иглы при равной толщине этих слоев,

t — температура теплоносителя в игле,

t_0 — температура ближайшей к игле поверхности грунта, обычно отдаленной от иглы тонким слоем воздуха или воды,

k — коэффициент теплопередачи через этот слой,

t_1, t_2, t_3 — температуры в срединах слоев грунта,

λ, c, γ — теплопроводность, теплоемкость и вес 1 м^3 грунта.

Имеем две группы уравнений для 1 пог. м иглы — уравнения теплообмена между слоями и уравнения теплоусвоения слоев.

1-е уравнение теплообмена — между теплоносителем и первым слоем грунта²:

$$k(t - t_1)\pi d_0 d\tau = \frac{2\pi\lambda}{\ln \frac{d_1}{d_0}} (t_0 - t_1) d\tau, \quad (1)$$

откуда

$$t_1 = t_0 \left(1 + \frac{k d_0}{2\lambda} \ln \frac{d_1}{d_0}\right) - t \cdot \frac{k d_0}{2\lambda} \ln \frac{d_1}{d_0}$$

или

$$t_1 = t_0(1 + s) - ts, \quad (1')$$

если

$$s = \frac{k d_0}{2\lambda} \ln \frac{d_1}{d_0}.$$

Для последующего найдем еще

$$\frac{dt_1}{d\tau} = \frac{dt_0(1 + s)}{d\tau} = f' \cdot (1 + s),$$

если

$$f' = \frac{dt_0}{d\tau}.$$

2-е уравнение теплообмена:

$$\frac{2\pi\lambda}{\ln \frac{d_1}{d_0}} (t_0 - t_1) d\tau = \frac{2\pi\lambda}{\ln \frac{d_2}{d_1}} (t_1 - t_2) d\tau + \frac{C_1}{2\pi\lambda} dt_1, \quad (2)$$

если $C_1 = c\gamma F_1$, где F_1 — площадь торца первого слоя. Подставляя значения для t_1 и для $\frac{dt_1}{d\tau}$ из предыдущего, получим:

$$t_2 = t_0[1 + s(1 + s)] - ts(1 + s) + \frac{C_1}{2\pi\lambda} + (1 + s)f' \ln \frac{d_2}{d_1}, \quad (2')$$

¹ Он представляет вариант общего метода, который приведен в нашем курсе «Теплопередача в строительстве», 1939, стр. 117 и сл.

² В формуле (1) величина $\frac{2\pi\lambda}{\ln \frac{d_1}{d_0}}$ — обратная сопротивлению цилиндрического слоя $\frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_1}{d_0}$.

если

$$\sigma = \frac{\ln \frac{d_2}{d_1}}{\ln \frac{d_1}{d_0}}.$$

Для последующего найдем еще

$$\frac{dt_2}{d\tau}.$$

3-е уравнение теплообмена:

$$-\frac{2\pi\lambda}{\ln \frac{d_2}{d_1}} (t_1 - t_2) d\tau = -\frac{2\pi\lambda}{\ln \frac{d_1}{d_0}} (t_2 - t_3) d\tau + C_2 dt_2. \quad (3)$$

Вставляя сюда выражения для t_1 , t_2 и $\frac{dt_2}{d\tau}$ и производя операции не в алгебраической форме, а при числовых значениях всех коэффициентов и параметров, получим:

$$t_3 = Af'' + Bf' + Ct_0 - D,$$

где A , B , C и D — постоянные числа.

Уравнения теплоусвоения слоев будут следующими.

1-е уравнение. Процесс распространился только на первый слой грунта (конец первого периода процесса). Имеем:

$$k(t - t_0) \pi d_0 d\tau = C_1 dt_1. \quad (4)$$

Приняв $\frac{dt_1}{d\tau} = f'(1+s)$, получим:

$$k(t - t_0) \pi d_0 = C_1 f'(1+s). \quad (5)$$

Для того же момента времени имеем уравнение $t_2 = 0$, т. е.

$$t_0 [1 + s(1+s)] - ts(1+s) + \frac{C_1}{2\pi\lambda} f'(1+s) = 0.$$

Вставляя сюда выражение для последнего члена из уравнения (5) и решая полученное уравнение относительно t_0 , получим¹, при обозначении

$$\psi = k \frac{d_0}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1},$$

$$t_{0,1} = t \cdot \frac{s(1+s) - \psi}{1 + s(1+s) - \psi}. \quad (t_{0,2})$$

Для того же момента найдем t_1 по формуле (t_1) и $\Delta_1\tau$ по уравнению (4), если dt_1 и $d\tau$ заменим конечными разностями Δt_1 и $\Delta\tau$ (интегрирование).

Так как при этом величина t_0 меняется в промежутке времени от 0 до $\Delta_1\tau$, то вставим в уравнение (4) среднюю параболическую величину последней (по выпуклой параболе), т. е. $0,67 t_0$. Тогда получим:

$$\Delta_1\tau = C_1 \frac{\Delta t_1}{k\pi d_0(t - 0,67 t_0)}. \quad (\Delta_1\tau)$$

Само собою разумеется, что Δt_1 не совпадает с перепадом в середине слоя. Зная величины t_0 , t_1 и $\Delta_1\tau$ для рассматриваемого момента времени, можем определить величины t_0 и t_1 для последующих периодов из ряда Тэйлора:

$$t_0 = t_{0,1} + f'_1(\tau - \Delta_1\tau) + f''_1 \frac{(\tau - \Delta_1\tau)^2}{1 \cdot 2} + \dots,$$

где f'_1 уже определено выше, а последующие производные f''_1 , f'''_1 и т. д. могут быть определены

¹ Индекс 0,1 означает t_0 для конца первого периода процесса, когда им охвачен первый слой.

дифференцированием выражения для f'_1 . При этом имеем из уравнения (5) $f'_1 = \frac{(t - t_0) \pi d_0}{C_1(1+s)}$ и далее

$$f''_1 = -f'_1 \cdot \frac{\pi d_0}{C_1(1+s)}$$

2-е уравнение. Процесс распространился на два первых слоя грунта. Имеем:

$$k(t - t_0) \pi d_0 d\tau = C_1 dt_1 + C_2 dt_2. \quad (6)$$

Кроме того

$$t_3 = 0 \text{ и } \frac{dt_3}{d\tau} = 0.$$

Из этих трех уравнений найдем описанным выше порядком $t_{0,2}$, f'_2 и f''_2 , пренебрегая дальнейшими производными, как быстро снижающимися. Наконец, найдем t_2 и затем

$$\Delta_2\tau = \frac{C_1 \Delta t_1 + C_2 \Delta t_2}{k\pi d_0(t - 0,67 t_0)}$$

или лучше

$$\Delta_2\tau = \frac{(C_1 + C_2) \Delta t_{cp}}{k\pi d_0(t - 0,67 t_0)},$$

где t_{cp} — средняя «взвешенная» температура обоих слоев.

Таким же образом рассчитываем и следующие стадии прогресса — трех, четырех и т. д. слоев, составляя и решая уравнения, как упомянутого, не в алгебраической форме, а в числовой.

Приведем небольшой пример числового расчета для случая простого согревания грунта, без наличия скрытой теплоты. Пусть

$t = 100^\circ\text{C}$, $d_0 = 0,05$ м, $d_1 = 0,15$ м, $d_2 = 0,35$ м и т. д.

$$\lambda = 1,0, k = 30^*, c = 0,30, \gamma = 2000.$$

Тогда

$$C_1 = c\gamma F_1 = 0,3 \cdot 2000 \cdot \pi \frac{0,25^2 - 0,05^2}{4} = 28,2 \text{ кал.}$$

$$s = \frac{30 \cdot 0,05}{2 \cdot 1,0} \cdot \ln \frac{0,15}{0,05} = 0,83,$$

$$\sigma = \ln \frac{0,35}{0,15} : \ln \frac{0,15}{0,05} = 0,75$$

$$\psi = \frac{30 \cdot 0,05}{2 \cdot 1,0} \ln \frac{0,35}{0,15} = 0,62.$$

По формуле (t_0) имеем:

$$t_{0,1} = 100 \cdot \frac{0,83 \cdot 1,75 - 0,62}{1 + 0,83 \cdot 1,75 - 0,62} = 46^\circ,$$

а по (t_1):

$$t_1 = 46 \cdot 1,83 - 100 \cdot 0,83 = 1,2^\circ\text{C}.$$

Для момента, когда процесс распространился на два слоя, имеем следующие уравнения. Уравнение (3) в числах дает нам:

$$7,6(t_1 - t_2) = 14(t_2 - t_3) + 66 \frac{dt_2}{d\tau},$$

так как

$$C_2 = 0,30 \cdot 2000 \cdot \pi \left(\frac{0,45^2 - 0,25^2}{4} \right) = 66.$$

* По опытам ВО ВНИИХИ (инж. Сердюков) величина k составляет 30—50 кал/м² ч. 1°C .

Вставляем в предыдущее уравнение

$$t_1 = t_0(1 + s) - ts = 1,83 t_0 - 83$$

и

$$t_2 = t_0[1 + s(1 + \varepsilon)] - ts(1 + \varepsilon) + \\ + \frac{C_1}{2\pi\lambda} (1 + \varepsilon) f' \ln \frac{d_2}{d_1} = 2,45 t_0 - 145 + \\ + \frac{28,2 \cdot 1,83 f' \cdot 0,83}{6,28} = 2,45 t_0 - 145 + 6,8 f',$$

наконец

$$-\frac{dt_2}{d\tau} = 2,45 f' + 6,8 f'';$$

тогда получим из него

$$t_3 = 2,8 t_0 + 22 f' + 32 f'' - 17,9.$$

Уравнение (6) будет в числах:

$$4,71(t - t_0) = 28,2 \frac{dt_1}{d\tau} + 66 \frac{dt_2}{d\tau}.$$

Вставив сюда

$$-\frac{dt_1}{d\tau} = 1,83 f' \text{ и } -\frac{dt_2}{d\tau} = 2,45 f' + 6,8 f'',$$

получим:

$$4,7 t_0 + 213,3 f' + 448,8 f'' - 471 = 0.$$

Вместе с уравнением:

$$t_3 = 2,8 t_0 + 22 f' + 32 f'' - 17,9 = 0$$

и его производной:

$$2,8 f' + 22 f'' = 0$$

получим из этих трех уравнений:

$$t_{0,2} = 55,3^\circ, \\ f'_2 = 1,4^\circ \text{ и } f''_2 = -0,17^\circ.$$

Далее найдем:

$$t_1 = 1,83 t_0 - 83 = 18^\circ, \quad t_2 = 0^\circ.$$

Для определения времени $\Delta_2 \tau$ имеем:

$$\Delta_2 \tau = \frac{(C_1 + C_2) \Delta t_{cp}}{k\pi d_0 (t - 0,67 t_0)}.$$

Для круга с температурой t_0 в центре t_{cp} при параболическом распределении температур составляет $1/6$ от t_0^* . В данном случае, когда около центра температура t_0 представлена окружностью, t_{cp} будет несколько выше. Чтобы избежать сложных вычислений, оставляем в запас этот излишек и принимаем

$$t_{cp} = \Delta t_{cp} = \frac{55,3}{6} = 9,2^\circ.$$

Тогда

$$\Delta_2 \tau = \frac{91,2 \cdot 9,2}{30 \pi \cdot 0,05 (100 - 0,67 \cdot 55,3)} = \sim 3 \text{ часа}.$$

Для практики подобные расчеты сложны. Но они дают возможность построить простую формулу, если применить здесь метод критериев. В самом деле, для согревания цилиндра, безотносительно к способу этого согревания, имеем известный критерий $F_0 = \frac{a\tau}{D^2}$ **. В данном случае к факторам

$$* t_{cp} = \frac{1}{F} \int_0^F t_x \cdot dx; \text{ при } F = \pi R^2, \quad dF = 2\pi x dx$$

и

$$t_x = \frac{t_0}{R^2} (R - x)^2 \text{ имеем } t_{cp} = \frac{t_0}{6}.$$

** D — диаметр прогретого грунтового цилиндра.

a и τ надо добавить действующие аналогично факторы k и d трубопровода. Третий, добавочный, фактор — степень прогрева, отношение конечного перепада температур (нагревателя и средней температуры грунта) к начальному — является в данном случае величиной постоянной, поскольку на периферии прогретого грунтового цилиндра температура всегда равна 0° , а в центре t_0 . Степень прогрева равна, следовательно, $1 - \frac{1}{6} = 0,83$. Наконец, заметим, что диаметр d трубы должен войти в степени, меньшей единицы, хотя площадь прогрева и пропорциональна ему, но одновременно с его увеличением уменьшается коэффициент α теплоперевода на единицу этой площади. На основании формул Нуссельта и Крауссольтца в конвекционной теории можно положить показатель степени равным 0,75. Итак имеем критерий:

$$K = \frac{0,83 a\tau k d^{0,75}}{D^2}$$

или

$$A = \frac{a\tau k d^{0,75}}{U^2},$$

причем в A скрыта и степень прогрева (0,83).

Написанная формула дает возможность определять в частных случаях практики величины τ или D . Например

$$\tau = A \frac{D^2}{a\tau k d^{0,75}}. \quad (A)$$

На основании приведенного теоретического расчета найдем «теоретическое» значение A из:

$$3,0 = \frac{0,45^2}{0,0017 \cdot 30 \cdot 0,05^{0,75}},$$

откуда $A = 0,08$. Ввиду наличия диаметра трубы в центре вместо точки можно принимать $A = 0,10$.

Однако в теоретическом расчете не учтен ряд факторов: теплотери прогреваемого цилиндра вверх и вниз, теплотери на испарение почвенной влаги около прогретателя, теплотери разводящих трубопроводов между котлом и иглами. Надо думать, что в практике коэффициент будет значительно выше. Его можно было бы легко установить двумя-тремя наблюдениями, но только при непрерывном действии прогретателя¹. По некоторым наблюдениям можно полагать в практике $A = 0,20$.

Наши примеры расчетов прогрева грунта не имели в виду собственно размораживания с учетом скрытой теплоты таяния льда. Однако выведенные формулы, как расчетные аналитические, так и проверочная по критерию, относятся принципиально ко всем случаям прогрева и размораживания. Для применения их к последнему случаю следует только, как было показано ранее, брать соответствующие значения величин c_y и a_y грунта.

Наконец, необходимо заметить, что формула (A) имеет лишь узкопрактическое значение (для $D \leq 2-2,5$ м), так как не учитывает указанных выше практических факторов.

¹ Наблюдения б. Гипрооргстроя были очень отрывочными и в условиях перерывов в действии котла.

Новый способ определения давления грунта на подпорную стенку¹

Инж. Н. В. БУЛГАКОВ
(Член Общества водников)

Рассмотрим условия равновесия грунтового массива, ограниченного откосом, расположенным под углом ω к горизонту. Поверхность грунта выше представляет плоскость, составляющую угол α с горизонтом (рис. 1).

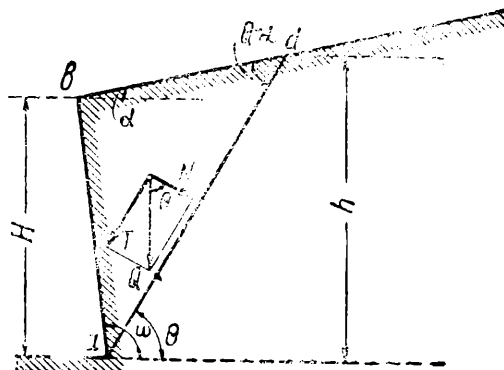


Рис. 1

Предположим, что оползание грунтового массива происходит по плоскости ad , наклонной под углом θ к горизонту.

Проекция веса Q оползающего грунта в направлениях параллельном и перпендикулярном плоскости ad будут:

$$T = Q \sin \theta;$$

$$N = Q \cos \theta.$$

Оползанию грунта по плоскости ad противодействуют силы сцепления:

$$c \cdot \overline{ad} = c \frac{h}{\sin \theta}$$

и силы трения:

$$N \operatorname{tg} \varphi = Q \cos \theta \operatorname{tg} \varphi.$$

Условия равновесия грунта определяются равенством:

$$T = N \operatorname{tg} \varphi + c \cdot \overline{ad},$$

или

$$Q \sin \theta = Q \cos \theta \operatorname{tg} \varphi + \frac{ch}{\sin \theta}. \quad (1)$$

Вес оползающего грунта будет:

$$Q = \frac{\gamma}{2} ab \cdot \overline{ad} \cdot \sin(\omega - \theta),$$

где, как видно из рис. 1:

$$ab = \frac{H}{\sin \omega},$$

$$\overline{ad} = \frac{h}{\sin \theta}.$$

Отсюда находим:

$$Q = \frac{\gamma H h \sin(\omega - \theta)}{2 \sin \omega \sin \theta}. \quad (2)$$

Решаем уравнение (1) относительно c :

$$c = \frac{Q}{h} (\sin \theta - \cos \theta \operatorname{tg} \varphi) \sin \theta$$

и подставляем вместо Q полученное для него значение из формулы (2):

$$c = \frac{\gamma H \sin(\omega - \theta)}{2 \sin \omega} (\sin \theta - \cos \theta \operatorname{tg} \varphi).$$

Заменяя $\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi}$ и преобразовав выражение,

заключенное в скобки, окончательно имеем:

$$c = \frac{\gamma H \sin(\omega - \theta)}{2 \sin \omega \cos \varphi} \sin(\theta - \varphi).$$

Обрушение грунта происходит при полном использовании сил сцепления c , поэтому в плоскости обрушения эти силы получают свое максимальное значение.

Для определения положения опаснейшей плоскости скольжения берем производную $\frac{dc}{d\theta}$ и приравниваем ее нулю:

$$\begin{aligned} \frac{dc}{d\theta} &= \frac{\gamma H}{2 \sin \omega \cos \varphi} [\sin(\omega - \theta) \cos(\theta - \varphi) - \\ &\quad - \cos(\omega - \theta) \sin(\theta - \varphi)] = \frac{\gamma H}{2 \sin \omega \cos \varphi} \cdot \\ &\quad \cdot \sin[(\omega - \theta) - (\theta - \varphi)] = \frac{\gamma H \sin(\omega - 2\theta + \varphi)}{2 \sin \omega \cos \varphi}. \end{aligned}$$

Выражение

$$\frac{\gamma H}{2 \sin \omega \cos \varphi} \neq 0.$$

Поэтому нулю должен равняться множитель

$$\sin(\omega - 2\theta + \varphi) = 0.$$

Отсюда находим:

$$\omega - 2\theta + \varphi = 0; \quad 2\theta = \omega + \varphi; \quad (3)$$

$$\theta = \frac{\omega + \varphi}{2}.$$

Если

$\omega < 90^\circ$, то $H = ab \cos(90^\circ - \omega) = ab \sin \omega$;

$$ab = \frac{H}{\sin \omega}.$$

¹ Работа выполнена в общественном порядке по линии Ленинградского отделения Общества водников.

Поэтому формула (3) верна для всех случаев, когда

$$\omega = 90^\circ.$$

При $\omega = 90^\circ$ находим

$$\theta_0 = 45^\circ + \frac{\varphi}{2}.$$

Очевидно также, что формула (3) верна, когда угол α отрицателен и когда поверхность грунта горизонтальна ($\alpha = 0$).

Активное давление сыпучего грунта на стенку подпорного сооружения, в соответствии с предложением Кулона рассматривать призму сползания в состоянии предельного равновесия, в общем случае определяется по формуле:

$$E = Q \frac{\sin(\theta - \varphi)}{\sin(\theta + 90^\circ - \varepsilon - \delta - \varphi)}, \quad (4)$$

выведенной на основании существующей зависимости между элементами силового треугольника (рис. 2), где:

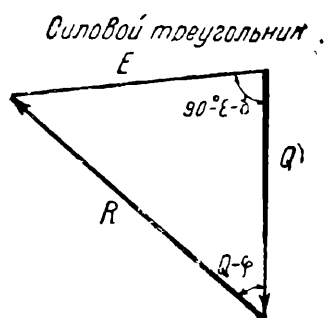


Рис. 2

Q — вес оползающей массы грунта, рассматриваемой как твердое тело;
 ε — угол наклона стенки к вертикали;
 δ — угол трения грунта о стенку;
 φ — угол внутреннего трения грунта;
 θ — угол наклона плоскости обрушения к горизонту.

Если принять, как обычно это делают, что $\delta = 0$, а также имея в виду, что $\varepsilon = \omega - 90^\circ$, получим:

$$\begin{aligned} E &= Q \frac{\sin(\theta - \varphi)}{\sin(\theta + 90^\circ - \omega + 90^\circ - \varphi)} = \\ &= Q \frac{\sin(\theta - \varphi)}{\sin[180^\circ - (\omega + \varphi - \theta)]} = \\ &= Q \frac{\sin(\theta - \varphi)}{\sin(\omega + \varphi - \theta)}. \end{aligned} \quad (5)$$

Для случая, когда $\omega < 90^\circ$, имеет $-\varepsilon = 90^\circ - \omega$ и, следовательно, получаем тот же результат.

По Кулону самым опасным давлением на стенку будет наибольшее давление и наиболее вероятной плоскостью скольжения будет m^1 , которая соответствует $E_{\max}$.

Для этого берем производную $\frac{dE}{d\theta}$ и находим значение угла θ , обращая производную в нуль. Максимальное давление на стенку определяется путем подстановки найденного угла θ в формулу (4).

В соответствии с предложением самого Кулона рассматривать сползающую призму грунта как бы затвердевшей в виде клина с плоскими сторонами, было бы правильнее ожидать, что оползание грунта как и разрушение всякого однородного тела, при нарушении равновесия будет происходить по пло-

скости, где возникают максимальные скалывающие (срезающие) напряжения.

Поэтому и опасным давлением грунта на стенку правильнее считать то, которое получается при обрушении грунта по плоскости, где возникают максимальные скалывающие напряжения.

Вообще говоря, плоскость, по которой действуют максимальные скалывающие напряжения, не совпадает с плоскостью скольжения, соответствующей $E_{\max}$ и опасное давление на стенку будет несколько меньше получаемого по Кулону.

Найдем положение плоскости обрушения для наиболее простого случая, когда отсутствуют силы сцепления и внутреннее трение грунта ($c = 0$ и $\varphi = 0$).

Для этого случая скалывающие напряжения

$$\tau = \frac{Q \sin \theta}{ad}$$

или, подставив в это уравнение Q из формулы (2) и

$$ad = \frac{h}{\sin \theta};$$

$$\tau = \frac{\gamma H \sin(\omega - \theta) \sin \theta}{2 \sin \omega}$$

Берем производную $\frac{d\tau}{d\theta}$ и приравняем ее нулю:

$$\begin{aligned} \frac{d\tau}{d\theta} &= \frac{\gamma H}{2 \sin \omega} [-\sin \theta \cos(\omega - \theta) + \\ &+ \cos \theta \sin(\omega - \theta)] = 0. \end{aligned}$$

Отсюда находим

$$\sin \theta \cos(\omega - \theta) = \cos \theta \sin(\omega - \theta);$$

$$\operatorname{tg} \theta = \operatorname{tg}(\omega - \theta); \quad \theta = \omega - \theta; \quad \theta = \frac{\omega}{2}.$$

Подставляя в формулу (5) $\theta = \frac{\omega}{2}$, находим опасное давление на стенку:

$$E = Q \frac{\sin(\theta - \varphi)}{\sin(\omega + \varphi - \theta)} = Q = \frac{\gamma H^2}{2 \sin \omega}$$

Получили гидростатическое давление воды на наклонную стенку, что подтверждает правильность нашего предположения принимать за плоскость обрушения ту, по которой действуют максимальные скалывающие напряжения.

При

$$\omega = 90^\circ,$$

$$E = \frac{\gamma H^2}{2},$$

имеем гидростатическое давление воды на вертикальную стенку.

Таким образом, давление воды на стенку можно рассматривать как частный случай давления грунта на стенку, у которой $c = 0$ и $\varphi = 0$.

Для случая, когда $\varphi \neq 0$, имеем:

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{Q \sin \theta}{ad} - \frac{Q \cos \theta \operatorname{tg} \varphi}{ad} = \frac{Q}{ad} (\sin \theta - \\ &- \cos \theta \operatorname{tg} \varphi) = \frac{\gamma H \sin(\omega - \theta)}{2 \sin \omega} (\sin \theta - \cos \theta \operatorname{tg} \varphi). \end{aligned}$$

¹ Инж. Г. Крей, Теория давления земли и сопротивления грунтов нагрузке, 1932, стр. 89.

Производная

$$\frac{a\tau}{d\theta} = \frac{\gamma H}{2 \sin \omega} [-\cos(\omega - \theta)(\sin \theta - \cos \theta \operatorname{tg} \varphi) + \sin(\omega - \theta)(\cos \theta + \sin \theta \operatorname{tg} \varphi)] = 0;$$

$$\operatorname{tg}(\omega - \theta) = \frac{\sin \theta - \cos \theta \operatorname{tg} \varphi}{\cos \theta + \sin \theta \operatorname{tg} \varphi} = \operatorname{tg}(\theta - \varphi);$$

$$\omega - \theta = \theta - \varphi.$$

Отсюда находим:

$$\theta = \frac{\omega + \varphi}{2}.$$

Действительно, сыпучие тела, имеющие внутреннее трение, оказывают давление на стенку меньшее гидростатического. Поэтому естественно ожидать, что плоскость их обрушения будет располагаться под большим углом θ к горизонту, чем плоскость обрушения тел, не имеющих внутреннего трения, и чем это трение больше, тем больше и угол θ .

Если силы сцепления рассматривать как сопротивление грунта срезыванию (прочность материала), то очевидно, что их наличие и величина не влияют на положение плоскости обрушения грунта.

Как отсюда вытекает, грунт, обладающий только силами сцепления, обрушается как и грунт не связанный, под углом к горизонту $\theta = 45^\circ$, и на положение плоскости обрушения влияет только угол внутреннего трения φ .

Очевидно, плоскость, в которой силы сцепления получают свое максимальное значение, и является той, в которой возникают наибольшие скалывающие напряжения.

Поэтому для получения опасного давления грунта на стенку E нужно в формулу (5) подставить

$$\theta = \theta_0 = \frac{\omega + \varphi}{2}. \quad (3)$$

Отсюда имеем:

$$E = Q \frac{\sin\left(\frac{\omega - \varphi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\omega + \varphi}{2}\right)}$$

или

$$E = Q \frac{\sin(\theta_0 - \varphi)}{\sin \theta_0}.$$

В полученную формулу для E подставим выражение из формулы (2):

$$E = \frac{\gamma H h \sin(\omega - \theta_0) \sin(\theta_0 - \varphi)}{2 \sin \omega \sin^2 \theta_0} = \frac{\gamma H h \sin^2(\theta_0 - \varphi)}{2 \sin \omega \sin^2 \theta_0}. \quad (6)$$

Выразим в формуле (6) h через H . Из рис. 1 находим:

$$h = H + bd \sin \alpha.$$

Из треугольника $a b d$ имеем:

$$\frac{bd}{\sin(\omega - \theta)} = \frac{ab}{\sin(\theta - \alpha)}.$$

Отсюда находим:

$$bd = \frac{ab \sin(\omega - \theta)}{\sin(\theta - \alpha)} = \frac{H \sin(\omega - \theta)}{\sin \omega \sin(\theta - \alpha)}.$$

Подставляем в формулу для h :

$$h = H + \frac{H \sin(\omega - \theta) \sin \alpha}{\sin \omega \sin(\theta - \alpha)} = H \left[1 + \frac{\sin(\omega - \theta) \sin \alpha}{\sin \omega \sin(\theta - \alpha)} \right].$$

Упрощаем полученное выражение:

$$\begin{aligned} \frac{\sin(\omega - \theta) \sin \alpha}{\sin \omega \sin(\theta - \alpha)} &= \frac{(\sin \omega \cos \theta - \cos \omega \sin \theta) \sin \alpha}{(\sin \theta \cos \alpha - \cos \theta \sin \alpha) \sin \omega} = \\ &= \frac{\cos \theta - \operatorname{ctg} \omega \sin \theta}{\sin \theta \operatorname{ctg} \alpha - \cos \theta} = \frac{1 - \operatorname{ctg} \omega \operatorname{tg} \theta}{\operatorname{tg} \theta \operatorname{ctg} \alpha - 1}; \\ 1 + \frac{\sin(\omega - \theta) \sin \alpha}{\sin \omega \sin(\theta - \alpha)} &= 1 + \frac{1 - \operatorname{ctg} \omega \operatorname{tg} \theta}{\operatorname{tg} \theta \operatorname{ctg} \alpha - 1} = \\ &= \frac{\operatorname{tg} \theta \operatorname{ctg} \alpha - 1 + 1 - \operatorname{ctg} \omega \operatorname{tg} \theta}{\operatorname{tg} \theta \operatorname{ctg} \alpha - 1} = \\ &= \frac{\operatorname{tg} \theta \operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{ctg} \omega \operatorname{tg} \theta}{\operatorname{tg} \theta \operatorname{ctg} \alpha - 1} = \frac{\operatorname{tg} \theta (\operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{ctg} \omega)}{\operatorname{tg} \theta \operatorname{ctg} \alpha - 1} = \\ &= \frac{\operatorname{tg} \theta (\operatorname{tg} \omega - \operatorname{tg} \alpha)}{\operatorname{tg} \omega (\operatorname{tg} \theta - \operatorname{tg} \alpha)}. \end{aligned}$$

Окончательно находим:

$$h = H \frac{\operatorname{tg} \theta (\operatorname{tg} \omega - \operatorname{tg} \alpha)}{\operatorname{tg} \omega (\operatorname{tg} \theta - \operatorname{tg} \alpha)}. \quad (7)$$

Подставляем полученное выражение для h в формулу (6):

$$E = \frac{\gamma H^2}{2} \cdot \frac{\sin^2(\theta_0 - \varphi) \operatorname{tg} \theta_0 (\operatorname{tg} \omega - \operatorname{tg} \alpha)}{\sin \omega \sin^2 \theta_0 \operatorname{tg} \omega (\operatorname{tg} \theta_0 - \operatorname{tg} \alpha)}. \quad (8)$$

По формуле (8) находится опасное давление на наклонную подпорную стенку, когда плоская поверхность грунта (выше стенки) расположена под углом $\pm \alpha$ к горизонту.

Действительно, при α :

$$h = H - bd \sin(-\alpha) = H + bd \sin \alpha.$$

Интенсивность распределения давления грунта a в различных точках по высоте стенки находится по формуле:

$$a = \frac{dE}{dH} = \gamma H \frac{\sin^2(\theta_0 - \varphi) \operatorname{tg} \theta_0 (\operatorname{tg} \omega - \operatorname{tg} \alpha)}{\sin \omega \sin \theta_0 \operatorname{tg} \omega (\operatorname{tg} \theta_0 - \operatorname{tg} \alpha)}. \quad (9)$$

Упростим формулы (8) и (9) для отдельных частных случаев.

1. Поверхность грунта выше стенки расположена под углом φ к горизонту ($\alpha = \varphi$)

В этом случае:

$$\omega - \theta_0 = \omega - \frac{\omega + \varphi}{2} = \frac{\omega - \varphi}{2};$$

$$\theta_0 - \varphi = \frac{\omega + \varphi}{2} - \varphi = \frac{\omega - \varphi}{2};$$

следовательно:

$$\omega - \theta_0 = \theta_0 - \varphi,$$

откуда треугольник abd равнобедренный (рис. 1)
и

$$ab = bd.$$

Находим:

$$\begin{aligned} h &= H + bd \sin \varphi = H + ab \sin \varphi = H + \frac{H \sin \varphi}{\sin \omega} = \\ &= H \left(1 + \frac{\sin \varphi}{\sin \omega} \right) = \frac{\sin \omega + \sin \varphi}{\sin \omega} H. \end{aligned}$$

Подставляем это выражение для h в формулу (6):

$$E = \frac{\gamma H^2}{2} \cdot \frac{\sin^2(\theta_0 - \varphi)(\sin \omega + \sin \varphi)}{\sin^2 \omega \sin^2 \theta_0}. \quad (10)$$

Интенсивность распределения давления по высоте стенки

$$a = \gamma H \frac{\sin^2(\theta_0 - \varphi)(\sin \omega + \sin \varphi)}{\sin^2 \omega \sin^2 \theta_0}. \quad (11)$$

2. Поверхность грунта выше стенки горизонтальна ($\alpha = 0$)

Имеем $H = h$, поэтому:

$$E = \frac{\gamma H^2}{2} \cdot \frac{\sin^2(\theta_0 - \varphi)}{\sin \omega \sin^2 \theta_0}; \quad (12)$$

$$a = \gamma H \frac{\sin^2(\theta_0 - \varphi)}{\sin \omega \sin^2 \theta_0}. \quad (13)$$

3. Стенка вертикальная ($\omega = 90^\circ$)

При вертикальной стенке:

$$\begin{aligned} \frac{\tan \alpha}{\tan \theta} &= \frac{h - H}{h} = 1 - \frac{H}{h}; \\ \frac{H}{h} &= 1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \theta}. \end{aligned}$$

Решаем полученное равенство относительно h :

$$h = \frac{H}{1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \theta}} = \frac{H \tan \theta}{\tan \theta - \tan \alpha}.$$

Подставляем это выражение в формулу (6):

$$E = \frac{\gamma H^2 \sin^2(\theta_0 - \varphi) \tan \theta_0}{2 \sin^2 \theta_0 (\tan \theta_0 - \tan \alpha)}.$$

Принимая во внимание, что $\theta_0 = 45^\circ + \frac{\varphi}{2}$,
находим:

$$\begin{aligned} E &= \frac{\gamma H^2}{2} \cdot \sin^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \cdot \\ &\cdot \frac{1}{\sin \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \cos \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \left[\tan \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) - \tan \alpha \right]} = \\ &= \frac{\gamma H^2}{2} \cdot \frac{\tan \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)}{\tan \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) - \tan \alpha} \end{aligned}$$

или

$$E = \frac{\gamma H^2}{2} \cdot \frac{\tan(\theta_0 - \varphi)}{\tan \theta_0 - \tan \alpha}, \quad (14)$$

$$a = \gamma H \frac{\tan(\theta_0 - \varphi)}{\tan \theta_0 - \tan \alpha}. \quad (15)$$

4. Стенка вертикальна и поверхность грунта выше стенки расположена под углом φ к горизонту ($\omega = 90^\circ$; $\alpha = \varphi$)

Подставим в формулу (14)

$$\tan \theta - \tan \varphi = \frac{\sin(\theta - \varphi)}{\cos \theta \cos \varphi}.$$

Отсюда:

$$\begin{aligned} E &= \frac{\gamma H^2}{2} \cdot \frac{\tan(\theta_0 - \varphi) \cos \theta_0 \cos \varphi}{\sin(\theta_0 - \varphi)} = \\ &= \frac{\gamma H^2}{2} \cdot \frac{\cos \theta_0 \cos \varphi}{\cos(\theta_0 - \varphi)} = \\ &= \frac{\gamma H^2}{2} \cdot \frac{\cos \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \cos \varphi}{\cos \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)} = \frac{\gamma H^2}{2} \tan \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \cos \varphi \end{aligned}$$

или

$$E = \frac{\gamma H^2}{2} \tan(\theta_0 - \varphi) \cos \varphi. \quad (16)$$

Находим интенсивность давления

$$a = \gamma H \tan(\theta_0 - \varphi) \cos \varphi. \quad (17)$$

5. Стенка вертикальная; поверхность грунта выше стенки горизонтальна ($\omega = 90^\circ$, $\alpha = 0$)

$$\begin{aligned} E &= \frac{\gamma H^2}{2} \cdot \frac{\tan(\theta_0 - \varphi)}{\tan \theta_0} = \\ &= \frac{\gamma H^2}{2} \cdot \frac{\tan \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)}{\tan \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right)} = \\ &= \frac{\gamma H^2}{2} \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right), \end{aligned}$$

или

$$E = \frac{\gamma H^2}{2} \tan^2(\theta_0 - \varphi). \quad (18)$$

Интенсивность давления:

$$a = \gamma H \tan^2(\theta_0 - \varphi). \quad (19)$$

Сравним давление грунта, получаемое по Кулону и по нашему способу, для случая, когда грунт выше вертикальной подпорной стенки расположен под углом к горизонту $\alpha = \varphi$.

По Кулону имеем

$$E = \frac{\gamma H^2}{2} \cos^2 \varphi. \quad (20)$$

По предлагаемому способу получили:

$$E = \frac{\gamma H^2}{2} \operatorname{tg}(\theta_0 - \varphi) \cos \varphi. \quad (16)$$

Разделим старую формулу (20) на новую (16):

$$\begin{aligned} \frac{E_{\text{ст}}}{E_{\text{нов}}} &= \frac{\frac{\gamma H^2}{2} \cos^2 \varphi}{\frac{\gamma H^2}{2} \operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \cos \varphi} = \\ &= \frac{\cos \varphi}{\operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)}. \end{aligned}$$

Из этого отношения видно, что разница в давлении зависит от угла внутреннего трения грунта φ .

Когда этот угол равен 0 ($\varphi = 0$), то

$$\frac{\cos \varphi}{\operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)} = 1$$

и, следовательно, $E_{\text{ст}} = E_{\text{нов}}$ и разницы никакой нет.

При $\varphi = 90^\circ$ получается неопределенность вида

$$\frac{0}{0}.$$

Для раскрытия этой неопределенности находим отдельно производные от числителя и знаменателя:

$$\frac{-\sin \varphi \cos^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)}{-\frac{1}{2}},$$

при $\varphi = 90^\circ$ имеем:

$$\frac{E_{\text{ст}}}{E_{\text{нов}}} = 2 \cdot 1 \cdot 1^2 = 2.$$

Таким образом, с изменением угла φ от 0 до 90° отношение давлений возрастает от 1 до 2.

В таблице приведены значения $\frac{E_{\text{ст}}}{E_{\text{нов}}}$ для различных углов φ :

φ	0°	10°	20°	30°	40°	90°
$\frac{E_{\text{ст}}}{E_{\text{нов}}}$	1,00	1,17	1,34	1,53	1,64	2,00

Как видно, старая формула при всех значениях угла φ дает преувеличенные результаты.

Для ломаной поверхности грунта, когда призма сползания имеет форму не треугольника, а многоугольника (полуоткос; откос, удаленный от стенки; полуоткос, удаленный от стенки, и т. д.) построение эпюры давления обычно производится приближенным способом с заменой криволинейных участков эпюры прямолинейными.

Пользуясь предлагаемым способом определения положения плоскости обрушений, можно производить точное построение криволинейных участков эпюры по специально выведенным для этого уравнениям.

Кроме этого, применение нового способа значительно облегчает учет давления на стенку от сплошной и сосредоточенных нагрузок, расположенных на поверхности грунта.

Хроника научных инженерно-технических обществ

В Обществе сельского хозяйства

Первый съезд Всесоюзного общества сельского хозяйства

В Москве, в Доме ученых, 12—15 февраля с. г. состоялся первый съезд Всесоюзного научного инженерно-технического общества сельского хозяйства (СЕЛЬХОЗВНИТО). На съезде присутствовало 60 делегатов, избранных секциями и отделениями Общества в Москве и Московской области, в Ленинграде, Ростове, Краснодаре, Кисе, Ташкенте и др. В числе делегатов ряд виднейших ученых страны, из них 3 академика, 1 член-корреспондент Академии наук СССР, 25 докторов и профессоров, 16 кандидатов наук и доцентов, 12 инженеров, агрономов и зоотехников. Почти половина делегатов — со стажем пребывания в Обществе от 10 до 15 лет и почти все (95,0%) — с высшим образованием.

Съезд обсудил ряд научных докладов членов Общества. акад. Н. В. Цицина, акад. В. С. Немчинова, члена-корреспондента Академии наук СССР проф. А. Н. Костякова, открывающих новые и оригинальные подходы к решению наиболее актуальных сельскохозяйственных задач в послевоенный период, получения высоких и устойчивых урожаев зерновых культур, принципов рационального сочетания отраслей земледелия и животноводства в колхозах и совхозах, активной борьбы с причинами засухи и т. п.

Исключительное внимание участников съезда привлек доклад акад. Н. В. Цицина об успехах в области отдаленной гибридизации растений. Съезд отметил подлинно новаторские достижения Н. В. Цицина и его сотрудников по переделке природы растений в интересах человека и единогласно избрал Н. В. Цицина почетным членом Общества.

Первый съезд совпал с 15-летием существования Общества. В связи с этим съезд заслушал доклад зам. председателя Оргбюро, заслуженного члена Общества доктора сельскохозяйственных наук В. Д. Кислякова на тему: «15 лет работы Всесоюзного научного инженерно-технического общества сельского хозяйства», а также отчетный доклад о работе Оргбюро и ревизионной комиссии Общества за 1946 г. и полностью одобрил проведенную ими работу. Ряд членов Оргбюро представлены к званию заслуженного члена Общества, отмечены почетными грамотами и денежными премиями.

Съезд единогласно принял решение об изменении названия Общества и постановил именовать его «Всесоюзное сельскохозяйственное общество», а данный съезд — Первым съездом Всесоюзного сельскохозяйственного общества. Был одобрен и единогласно принят новый устав, избрано правление и ревизионная комиссия Общества. Президентом Общества избран лауреат Сталинской премии акад. Н. В. Цицин, вице-президентом — доктор сельскохозяйственных наук

В. Д. Кисляков, учёным секретарем — М. Г. Крутинский. В состав правления избраны также: лауреат Сталинской премии акад. В. С. Немчинов, действительный член ВАСХНИЛ, докт. проф. И. Я. Якушкин и докт. проф. В. И. Эдельштейн, профессора и доктора В. В. Алпатов, П. Я. Гуров, С. К. Кондрашов, А. П. Редькин, Ф. Э. Реймерс, Н. С. Соколов (Москва), заслуж. деят. науки проф. Н. Н. Богданов-Катков (Ленинград), действительный член Украинской Академии наук Н. Н. Гришко (Украина), зам. министра сельского хозяйства Украины тов. Луценко, доц. И. М. Минин (Свердловск), проф. И. Н. Захарьев (Фрунзе), проф. И. А. Минкевич и агроном Василенко (Краснодар), проф. Н. Н. Архангельский (Ростов), проф. А. О. Петрусов (Воронеж), проф. С. А. Мельник (Одесса), проф. В. Р. Ридигер и проф. Г. Н. Виноградов (Ташкент), зам. председателя Технического Совета Министерства сельского хозяйства СССР канд. с.-х. наук Н. Я. Чмора,

начальник Племенного управления Министерства совхозов СССР Е. П. Бугримов и др. В составе правления — 4 академика, 19 докторов и профессоров, 3 кандидата наук, 9 агрономов, инженеров и зоотехников, в том числе: 5 лауреатов Сталинской премии, 4 заслуженных деятеля науки, 7 заслуженных членов Общества. В состав правления избран также канд. сельскохозяйственных наук Ф. М. Мартынов, бывший в 1937—1939 гг. зам. председателя Общества. Был обсужден и принят наказ первому составу правления Общества.

В работах съезда приняли участие свыше двухсот гостей — членов Общества, профессоров, докторов, кандидатов наук, агрономов, зоотехников, инженеров и других представителей сельскохозяйственной интеллигенции Москвы.

Участники съезда с огромным воодушевлением приняли приветствие Председателю Совета Министров СССР товарищу И. В. Сталину.

В Обществе текстильщиков

Всесоюзная конференция по электроприводу в текстильной промышленности

Конференция по электроприводу проходила в г. Иванове, важнейшем центре текстильной промышленности, в январе 1947 г. В программу работ конференции вошли наиболее актуальные вопросы энергетики и автоматики. Были заслушаны следующие доклады: 1) Возможность предвидения физических явлений из рассмотрения размерностей (проф. В. А. Ворошилов — председатель Ивановского отделения Общества текстильщиков), 2) Современное состояние и важнейшие задачи автоматизированного привода (канд. техн. наук Дранников, Ленинградский политехнический институт), 3) Современные схемы электроснабжения текстильных предприятий (инж. В. И. Разоренов, Текстильпроект), 4) Повышение естественного значения коэффициента мощности электрооборудования текстильных предприятий (канд. техн. наук Н. Н. Коновалов, Ивановский энергетический институт), 5) Современное состояние электропривода в текстильной промышленности (канд. техн. наук Дранников, Ленинградский политехнический институт), 6) Электропривод хлопчатобумажных ватеров (доц. М. Н. Мыльников, Ивановский текстильный институт), 7) Итоги эксплуатации электропривода на Меланжевом комбинате (инж. С. Г. Козлов, Меланжевый комбинат), 8) О направлении исследовательских работ Ленинградского текстильного института (доц. Бегинцев, Ленинградский текстильный институт), 9) Очередные задачи в области перестройки работы по экономии и нормированию расхода электроэнергии текстильных предприятий (канд. техн. наук Н. А. Коновалов, Ивановский энергетический институт), 10) Электропривод в отделочном производстве текстильных фабрик (канд. техн. наук А. М. Быстров), 11) Электросистема автоматизации управления вентиляционно-увлажнительными установками (старший научный сотрудник П. С. Бородин, Институт охраны труда), 12) Итоги эксплуатации электропривода на фабрике «Красная Талка» и борьба за экономию электроэнергии (инж. С. А. Смирнов), 13) Итоги эксплуатации электропривода на фабрике им. рабочего Ф. Зиновьева (инж. Семенов), 14) Реконструкция двигателя требования работы рабочих машин (инж. Ф. Ф. Курицын, Общество текстильщиков), 15) Флуоресцирующие лампы (инж. И. И. Дмитриевская, Институт охраны труда).

На основании докладов и прений конференция приняла решения:

I. Электропривод в прядильном производстве.

а) Разрыв хлительно-трепальные агрегаты. Принятый тип электропривода можно считать удовлетворительным. Ближайшая задача заключается в дальнейшем приспособлении характеристик двигателей и их форм исполнения применительно к требованиям производственных механизмов.

б) Электропривод кардочесальных машин. Существующий тип индивидуального электропривода является неудовлетворительным, вследствие несоответствия характеристик двигателя требованиям работы рабочих машин (большой инерционный момент, несовершенство сопряжения, неудовлетворительная аппаратура управления).

Считать необходимым постановку работ научно-исследовательского характера для изыскания более совершенного типа одиночного электропривода кардочесальных машин.

в) Электропривод ленточно-банкаброш-ных машин. Привод ленточно-банкаброшных машин считать удовлетворительным. Улучшение должно идти в направлении приближения характеристики двигателей к требованиям машин (частые и плавные пуски) и усовершенствования схемы управления. Сочленение при помощи передачи тексрор считать удовлетворительным.

г) Электропривод хлопкопрядильных ватеров. Привод от коллекторных двигателей переменного тока дает возможность получить желательную регулировку скорости. Практика применения имевшихся механических автоматических регуляторов прядения себя не оправдала и вопрос полного регулирования скорости ватеров остается нерешенным. Необходимо провести научно-исследовательские и экспериментальные работы в области изыскания более совершенного типа привода, используя современные достижения техники.

II. Электропривод в ткацком производстве.

Используемый электропривод ткацкого станка с непосредственным, постоянным сцеплением двигателя с машиной приводит к быстрому износу электродвигателей. Система сочленения электродвигателя со станком, разработанная Климовским заводом, не является совершенной. Необходимо провести изыскания, чтобы иметь тип электропривода, удовлетворяющего как энергетиков, так и технологов.

III. Электропривод в приготовительном отделе. Шлихтовальные машины.

Существующий электропривод шлихтовальных машин является менее совершенным по сравнению с электроприводом с коллекторными двигателями переменного тока.

IV. Электропривод отделочных машин.

а) В производстве отбельного цеха необходима ориентация на применение асинхронных короткозамкнутых двигателей, как наиболее отвечающих условиям среды отбельной. Следует продолжать изучение опыта работы агрегата системы ИВНИТП, провести научно-исследовательскую работу по выявлению рациональных методов плавного регулирования скорости асинхронных короткозамкнутых двигателей и по улучшению конструкций преобразователей частоты.

б) Необходимо поставить вопрос о быстрейшем освоении новой серии коллекторных двигателей переменного тока, наиболее полно отвечающих требованиям электропривода отделочных машин как в случае их раздельной, так и совместной работы в системе агрегата.

Временно, до освоения коллекторных двигателей переменного тока, привод агрегатов осуществлять на шунторегулируемых двигателях постоянного тока, а также по схеме Леонарда, причем в некоторых случаях выявить возможность использования схемы Леонарда с серийными двигателями.

в) Необходимо создание опытного агрегата для проведения научно-исследовательских и экспериментальных работ по многодвигательным электроприводам.

V. По примеру станкостроительной промышленности необходимо организовать производство специализированной пуско-регулирующей и защитной аппаратуры для нужд электропривода и автоматики в текстильной промышленности (магнитные пускатели и т. п.), так как применяемая в настоящее время совершенно не удовлетворяет требованиям эксплуатации электроприводов.

VI. Считать важнейшей задачей обеспечение текстильной промышленности контрольно-измерительными приборами и приборами учета.

VII. Считать необходимым самое широкое внедрение в текстильную промышленность автоматики в управление электроприводами и технологическими процессами.

В первую очередь работу по автоматизации проводить по следующим вопросам: а) автоматическая обдувка ватеров; б) автоматическая присучка нитей; в) контроль за неравномерностью ленты, холстов, качеством прочеса; г) автоматизация химических процессов в крашении; д) автоматизация сушки пряжи; е) электроостанов сновальных машин.

VIII. Схемы электроснабжения текстильных фабрик:

а) рекомендовать внедрение принципов максимального приближения питательных пунктов к центрам нагрузки по высокому напряжению,

б) отметить, что для рационального электроснабжения одноэтажных корпусов размещение «ТП» внутри корпуса возможно в случае применения трансформаторов, не опасных в пожарном отношении,

в) следует признать желательным разработку конструкции «ТП» для многоэтажных корпусов по всей высоте здания.

IX. Экономия и нормирование электроэнергии:

а) Внедрить в течение 1947—1948 гг. в практику работы текстильных предприятий метод систематического оперативного контроля над динамикой изменения электроснабжения электроприводов.

В основу оперативного контроля положить паспорт двигателя и измерение любой из следующих величин: мощности, энергии тока, скольжения, выбега.

б) На основе данных оперативного контроля приступить к составлению и изучению энергетических характеристик и электробаланса отдельных производственных машин, агрегатов, производственных отделов и фабрик в целом.

в) Требовать обязательного производства анализа электробаланса и разработки на его основе плана мероприятий по экономии электроэнергии с соответствующими техническими расчетами.

X. Идею автоматического управления и регулирования установками теплообменной вентиляции в цехах текстильных фабрик с незначительной запыленностью, основанную на использовании электрических схем, конференция считает правильной.

Конференция высказывается за необходимость ускоренных производственных испытаний на фабриках системы автоматизации, разработанной тов. Бородиня.

XI. Оказание технической помощи и повышение квалификации фабричных энергетиков.

а) Отделу энергетики Министерства текстильной промышленности совместно с Обществами энергетиков и текстильщиков приступить к изданию серии эксплуатационных инструкций, а также правил и норм технической эксплуатации текстильных предприятий.

Считать необходимым выпустить справочник энергетика текстильной промышленности.

б) Через отделения Общества и Институт усовершенствования Министерства текстильной промышленности организовать очные и заочные курсы по повышению квалификации фабричных энергетиков,

в) Оживить работу отдела «Учеба и обмен опытом» в журнале «Текстильная промышленность».

г) Для общего направления работ в области электропривода на текстильных фабриках, объединения их, постановки новых проблем, осуществления обмена опытом и исследованиями, конференция считает необходимым создание лабораторий по энергетике при существующих институтах.

XII. Конференция высказывает сожаление, что в ее работах не приняла участия представители Министерства электропромышленности и Министерства машиностроения и приборостроения, которые могли бы оказать большую помощь в разрешении поставленных конференцией вопросов.

Критика и библиография

1. Новые достижения химии и технологии вяжущих веществ¹

(Из доклада проф. В. Ф. Журавлева на научно-технической конференции ЛХТИ в 1946 г.)

Многочисленные научно-исследовательские работы в области бетона, выполненные в последние годы за границей, делятся на две группы. В первой группе работ стремятся уменьшить водоцементный фактор и во второй — улучшить поверхностные свойства бетона и предохранить его от разрушения.

Для процесса гидратации и твердения портланд-цемента нужно значительно меньше воды, чем имеется в бетонной смеси. Необходимость увеличения количества воды в бетонной смеси против того количества, которое необходимо для нормального течения процессов гидратации и твердения определяется требуемой пластичностью смеси.

Известно, что увеличение количества воды приводит к уменьшению прочности бетона и к увеличению его пористости.

Уменьшение водоцементного фактора без изменения пластичности и удобоукладываемости достигалась двумя способами. По первому способу в бетонную смесь вводится особая добавка, которая носит название «пластификатор». Количество этой добавки составляет 1% от веса цемента. Эта добавка обладает весьма сильно выраженными пластифицирующими свойствами, что позволяет увеличивать прочность бетона почти вдвое. Второй способ уменьшения водоцементного фактора заключается в применении особого вибрацион-

ного способа укладки бетона, обеспечивающего весьма высокую его техническую прочность.

Улучшение поверхностных свойств бетона достигается различными способами. Очень эффективным способом является введение в бетонную смесь воздушоудерживающих добавок. Наиболее распространенная добавка — винсол, продукт переработки канифоли. Введение небольших количеств винсола увеличивает пластичность бетонной смеси, значительно увеличивает морозостойкость и уменьшает водопроницаемость.

Вторым мероприятием является применение абсорбирующей опалубки. При укладке бетона в опалубку часть воды скапливается на поверхности бетона, разрыхляя эту поверхность и образуя раковины и пустоты. Применение абсорбирующей опалубки способствует поглощению воды, снижает водоцементный фактор в поверхностном слое бетона и создает более плотную поверхность.

При схватывании и первоначальном твердении бетона наблюдается интенсивное испарение воды из поверхностного слоя бетона, что приводит к образованию большого количества мелких волосных трещин и снижению прочности. Для предохранения поверхности бетона от быстрого испарения влаги и связанного с этим образования волосных трещин применяют покрытие брезентом, мокрыми опилками, соломой и т. д.

В США в последнее время применяют целлофан, наносимый из краскопульты в жидком виде.

¹ Из картотеки, опубликованной Горьковским НИТО строителей.

2. Аннотации трудов Общества водников

Вышел в свет первый том труда «Новые типы морских гидротехнических сооружений»¹. Работа издана Инженерным управлением военно-морских сил и Всесоюзным научным инженерно-техническим обществом водного транспорта.

Отсутствие в советской и зарубежной литературе достаточных данных по теории и практике проектирования гидротехнических сооружений на больших морских глубинах, при особо неблагоприятных геологических условиях, побудило Общество водников заняться разработкой этого вопроса. По заданию Инженерного управления военно-морских сил Общество провело конкурс на лучшее решение пловучих ограждающих и причальных сооружений в трудных естественно-геологических условиях, в различных районах морских побережий, с учетом особых условий открытых морских побережий, удаленных от промышленных центров нашей необъятной Родины.

Были объявлены следующие темы:

- 1) морское ограждающее сооружение на больших глубинах при слабом основании,
- 2) пловучие ограждающие сооружения на больших глубинах при слабом основании,
- 3) пловучий пирс,
- 4) сборно-разборный причал.

Перед участниками конкурса стояли весьма сложные задачи, особенно в отношении условий фундирования сооружений на разжиженных илах с общей толщиной залегания их на большой глубине, в области расчета волногасящего действия сооружений, а также расчетов и проектирования соединений отдельных звеньев пловучего сооружения и способов закрепления сооружения в слабых грунтах оснований.

Представленные проекты обсуждались Советом жюри конкурса под председательством члена-корреспондента Академии наук СССР В. В. Звонкова. Каждый проект рассматривался с точки зрения правильности теоретического и конструктивного решения, экономической целесообразности, а также его соответствия практическим возможностям производства работ.

Имеется ряд весьма оригинальных проработок как по теоретическим вопросам, так и по вопросам проектирования.

Некоторые типы сооружений, неудовлетворившие полностью условиям конкурса вследствие весьма тяжелых исходных данных, могут быть использованы при проектировании аналогичных сооружений при более благоприятных естественных условиях.

В первый том труда вошли проекты по первым двум темам конкурса.

Наряду с обобщением опыта строительства существующих, а также разработанных на конкурсе типов сооружений в книге сообщаются полезные данные по теории расчета, проектированию и способам производства работ гидротехнических сооружений.

К книге приложен альбом основных чертежей проектов морских портовых гидротехнических сооружений (на 138 листах). В текстовой части даны иллюстрации по расчетной части проектов и способов производства работ.

Ценность книги заключается в новых идеях и анализе разнообразных типов сооружений, разработанных нашими лучшими специалистами, проектными организациями и научно-исследовательскими институтами.

Новизна и оригинальность этой работы, явившейся первым таким трудом не только в отечественной, но и мировой гидротехнической литературе, а также значительное количество проанализированных конструктивных типов, вызовет несомненный интерес среди отечественных гидротехников.

Вышли из печати сборники №№ 3 и 4 «Новости иностранной техники по водному транспорту», составленные Московским отделением общества².

¹ «Новые типы морских гидротехнических сооружений», т. I, «Ограждающие сооружения на больших глубинах при слабых грунтах основания». Авторы С. М. Румянцев, В. Л. Чугунов и др., под общей редакцией проф. Н. Н. Джунковского, проф. Г. А. Дуброва и др. Военное издательство Министерства вооруженных сил Союза ССР, М., 1946, стр. 220, цена 20 руб.

² «Новости иностранной техники по водному транспорту». Сборник № 3, Москва, издательство МРФ СССР, 1947, 3 п. л., тираж 1500 экз., цена 2 р. 25 к.; Сборник № 4, то же.

В сборнике № 3 помещены следующие статьи: «Канал для речных судов через полуостров Флориду (США); «Проект большого габаритного канала в одном уровне через территорию Англии»; «Американские дизельные буксиры, вступившие в эксплуатацию в годы войны»; «Паромы из понтонов для перевозки железнодорожного подвижного состава в США»; «Речное самоходное нефтеналивное судно «Миннеаполис Гаски»; «Буксирный теплоход-толкатель «Кеиз»; «Морской Мул», приспособленный для работы на реках»; «Пловучие электростанции в США»; «Передвижной электрокран»; «Передвижной погрузчик»; «Газоходы и дизельные суда»; «Смешанные автомобильно-речные пути в бассейне Верхней Амазонки».

В сборнике № 4 опубликованы следующие материалы: «Опыт исправительных работ в США»; «Ремонт металлических сварных судов»; «Судовые газовые двигатели дизеля с впрыскиванием добавочного жидкого топлива»; «Судно «Ренус 92» с носовыми винтами»; «Несамородные баржи для Темзы»; «Постройка сборных стальных барж в США фабричным способом»; «Английские сборные лихтеры-площадки»; «Установка винта с поворотными лопастями на пассажирском озёрном судне»; «Двухвинтовое пассажирское судно с газогенераторным двигателем»; «Пассажирские катеры для залива Сан-Франциско»; «Винтовые насадки на морских буксирах»; «Труба для испытания моделей кавитирующих винтов»; «Новый способ измерения глубин»; «Цельнометаллическая ручная тележка»; «Тележки для бочек»; «Складской кран».

Общество продолжает также выпуск «Листков технической информации». Вышло в свет уже 12 таких листов, объемом до 1 печатного листа каждый. В последних двух номерах содержится материал по применению малооловянистых баббитов в судоремонте (листок № 11) и по теплопередаче в дымогарных трубах судовых огнетрубных котлов (листок № 12).

Заменители высокооловянистых марок баббита, содержащие значительно меньший процент дефицитного олова, нашли широкое применение почти во всех странах. Малооловянистые баббиты по своей структуре соответствуют установленным правилам строения антифрикционных металлов, и, следовательно, могут успешно использоваться для заливки подшипников, работающих даже в ответственных узлах трения разных машин и механизмов. Необходимо, однако, соблюдать соответствующую технологию заливки и обработки.

Поскольку узлы трения являются ответственной частью любого механизма, в листке подчеркивается, что в процессе судоремонта нельзя допускать смещения разных малооловянистых и, тем более, безоловянистых баббитов, так как это может привести к неудовлетворительным результатам.

Приведен обзор оловянистых баббитов (германские, австрийские, чехословацкие, американские марки оловянистых баббитов), описание баббитов по ГОСТу и по ОСТу, результаты исследований баббита марки WM-10, применявшегося в Германии, данные испытаний химических, механических и на истирание, и результаты исследования микроструктуры баббитов.

Освещена область применения этой марки баббита: для подшипников и втулок паровых механизмов с кратковременной нагрузкой при определенных удельных давлениях и скоростях — паровые шпиль и брашпиль, паровая лебедка, паровая рулевая машина, насосы центробежный и поршневой, ручные шпиль и брашпиль, ручная рулевая машина, ручная лебедка, гребные колеса и др.

В главе «Заливка подшипников баббитом» типа WM-10 приводятся общие принципы работы, способы расплавления сплава, процессы подготовки вкладышей и заливки. Описаны наиболее часто встречающиеся дефекты заливки и меры борьбы с браком.

В листке № 12 освещен вопрос о теплопередаче в дымогарных трубах судовых огнетрубных котлов, дана критическая оценка существующих формул для расчета конвективного теплообмена в судовых паровых котлах. При сложной технике расчета эти формулы все же не обеспечивают необходимой точности результатов, что оправдывает применение упрощенных методов, в частности, методом применения теории подобия и сопоставления размерностей. Данный метод значительно облегчает исследования, когда последние не могут быть произведены математическим путем и базируются лишь на анализе опытных данных.

ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫЙ НАДЕЖНЫЙ МАТЕРИАЛ

СТАЛЬ САНДВИК



Подробные сведения о нашем производстве, облегчающие выбор нужного материала, Вы можете получить в нижеследующих каталогах, изданных на русском языке:

Транспортеры со стальной лентой	энз.
Стальные ленты для транспорта пищевых продуктов	
Справочник по стальным бесшовным трубам	
Сталь САНДВИК. Картина производства в снимках важнейших изделий	
Буровая сталь САНДВИК	
Нелегированное магнитное железо САНДВИК	
Сталь САНДВИК для постоянных магнитов	
Нержавеющая проволока САНДВИК	
Сталь серебрянка САНДВИК	
Холоднокатаная ленточная сталь САНДВИК	
Мембранная сталь САНДВИК	
Сталь САНДВИК для деталей текстильных машин	
Сталь САНДВИК для деталей конторских машин	
Сталь САНДВИК для компрессорных клапанов	
Сталь САНДВИК для автомобильных деталей	
Ленточная сталь САНДВИК для пил	
Ленточная сталь САНДВИК для измерительных инструментов	
Сборник докладов:	
О лесозаготовках и инструменте для них	
О нержавеющей стали и их применении	
О холодной прокатке ленточной стали	
О механической обработке, о ферромагнитных сплавах и о порошковой металлургии	
Горные буры КОРОМАНТ	
Опыт применения на горных разработках буров, армированных твердыми сплавами	
Инструкция по правке пил со скалывающим зубом	

Подготавливаются к печати

Нержавеющие трубы САНДВИК	
Нержавеющая сталь САНДВИК	
Пружинная сталь САНДВИК	
Сталь САНДВИК в зубоврачебной технике	
Сталь САНДВИК для часовой промышленности	
Руководство по транспортерам со стальной лентой	

Каталоги высылаются бесплатно

Укажите количество экземпляров нужных вам каталогов, заполните адресную карточку и пришлите анонс нам по адресу:

ШВЕЦИЯ — САНДВИКЕН
САНДВИКЕНСКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ЗАВОД

SANDVIKENS JERNVERKS AKTIEBOLAG — SANDVIKEN

Выписка заграничных товаров может исследовать лишь на основании действующих в СССР правил о монетации внешней торговли