

ЗАСЛУЖЕННЫЙ ПРОФЕССОРЪ  
† В. Л. КИРПИЧЕВЪ.

---

О Б Ъ  
**УСТАЛОСТИ МЕТАЛЛОВЪ.**

(Отдѣльные оттиски изъ журнала „Вѣстникъ Общества Технологовъ“).



С.-ПЕТЕРБУРГЪ.  
Типографія «Строитель», Фонтанка, 66.  
1914.

# Объ усталости металловъ

## въ связи съ ихъ кристаллическимъ строеніемъ.

Отъ Редаціи.

Помѣщаемая ниже статья покойнаго профессора Виктора Львовича Кирпичева была имъ почти подготовлена къ печати. Самъ Викторъ Львовичъ имѣлъ въ виду сдѣлать въ ней нѣкоторыя исправленія и потому на время отложилъ печатаніе. Однако лица <sup>1)</sup>, взявшія на себя просмотръ и корректированіе рукописи, нашли ее въ столь законченномъ видѣ, что надобности въ какихъ либо существенныхъ исправленіяхъ и дополненіяхъ по ихъ мнѣнію не представлялось вовсе.

Самое большое измѣненіе коснулось названія статьи и было вызвано тѣмъ, что заголовокъ, первоначально выбранный Викторомъ Львовичемъ: «Къ вопросу объ усталости металловъ», признанъ былъ слишкомъ скромнымъ и далеко не отвѣчающимъ широтѣ затронутыхъ вопросовъ. Всѣ же остальные поправки носятъ исключительно редакціонный характеръ, и къ тексту Виктора Львовича названныя лица отнеслись съ тою бережностью, къ которой обязывало ихъ благоговѣйное отношеніе къ памяти незабвеннаго учителя.

### Введеніе.

Давно уже замѣчены въ металахъ, примѣняемыхъ въ постройкахъ и машинахъ, такія явленія, которыя лучше всего характеризуются словомъ «усталость». Подобно живымъ существамъ, металлы устаютъ отъ работы, отъ

<sup>1)</sup> А. М. Драгомировъ и Н. Н. Давиденковъ.

службы, дѣлаются слабыми, непрочными, негодными для исполненія своихъ обязанностей. Къ металламъ часто теперь, въ особенности въ англійской технической литературѣ, примѣняютъ терминъ *выносливость* (Endurance). Есть выносливые металлы, которые могутъ работать долго, переносятъ интенсивную работу безъ усталости, безъ порчи своихъ свойствъ. И, обратно, бываютъ мало выносливые металлы, которые, даже исполняя сравнительно легкую работу, скоро устаютъ, дѣлаются слабыми, негодными къ дѣлу, и разрушаются.

Часто говорятъ о томъ, что металлъ состарился, отъ старости получилъ трещины (age cracks). Свойство быстро стариться чаще встрѣчается у сплавовъ мѣди, алюминія, вообще у нежелѣзистыхъ металловъ, рѣже у желѣза и стали <sup>1)</sup>. Сплавъ изъ равныхъ количествъ алюминія и никкеля уже черезъ мѣсяцъ по его изготовленіи не производя никакой работы, далъ трещины, а черезъ два мѣсяца разсыпался <sup>2)</sup>. Про такой металлъ можно сказать, что онъ умираетъ очень скоро послѣ рожденія. Это чисто лабораторный продуктъ, не пригодный для практическаго употребленія. Но и между примѣняемыми въ практикѣ мѣдными сплавами встрѣчаются такіе, для которыхъ старость наступаетъ очень скоро, въ особенности если изготовленіе предмета заключается въ холодной протяжкѣ, что имѣетъ мѣсто, напр., для ружейныхъ гильзъ; очень вредно для нихъ, если въ составъ сплава (состоящаго изъ мѣди и цинка) входитъ примѣсь свинца <sup>3)</sup>. Теперь при изученіи новыхъ сплавовъ мѣди считаютъ необходимымъ изслѣдовать, не будутъ ли они скоро стариться <sup>4)</sup>.

Профессоръ Carpenter и Edwards, стараясь найти нежелѣзистые металлы, настолько прочные, чтобы они

<sup>1)</sup> Впрочемъ, Hadfield указываетъ, что онъ константировалъ такую быструю порчу (degradation) у нѣкоторыхъ сплавовъ желѣза съ никкелемъ и желѣза съ марганцемъ. См. пренія по поводу 10-го доклада Комиссіи о сплавахъ въ Proc. Inst. Mec. Eng.

<sup>2)</sup> См. Zeit. d. Ver. deut. Ing. Band. 43, стр. 337.

<sup>3)</sup> Смотри статью Age Cracks in Copper Alloys въ Proceed. Inst. Civ. Eng. Vol. 167 p. 167.

<sup>4)</sup> См. десятый докладъ Комиссіи о сплавахъ и пренія по этому докладу.

годились для гидравлическихъ цилиндровъ, получили отъ разныхъ фирмъ много образцовъ; одна изъ фирмъ доставила однородный сплавъ, который «имѣлъ такую сильную склонность кристаллизоваться», что уже черезъ годъ по изготовленіи цилиндры, отлитые изъ такого металла, дѣлались пористыми, пропускали воду <sup>1)</sup>.

Затѣмъ, продолжая сравненіе металловъ съ живыми организмами, замѣчаемъ еще одну аналогію—а именно, находимъ и у металловъ *болѣзни* разнаго рода. Есть даже заразительныя болѣзни; можно прививать ихъ, какъ это показалъ Cohen <sup>2)</sup>. Ищутъ средства лечить больные металлы; иногда горячая ванна (кипятокъ) въ теченіе  $\frac{1}{4}$  часа поправляетъ металлъ; <sup>3)</sup> въ другихъ случаяхъ требуется болѣе сильное нагрѣваніе, до 850—900° С.

Въ живомъ организмѣ иногда происходитъ *перерожденіе* тканей. Аналогично этому и металлъ можетъ переродиться, хотя отъ другихъ причинъ. Чаще всего это происходитъ отъ высокой температуры, а иногда отъ низкой температуры, которая въ оловѣ вызываетъ болѣзнь перерожденія, такъ называемую *оловянную чуму* (*peste de l'etain*), часто замѣчаемую на старыхъ оловянныхъ предметахъ въ музеяхъ, отъ которой металлъ *разсыпается въ порошокъ* <sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> Proc. Inst. Mec. Eng. 1910. Oct.-Dec.

<sup>2)</sup> См. очень важное изслѣдованіе Die Metastabilität unserer Metallwelt, v. Ernst Cohen und Katsui Inoui въ Zeit. f. phys. Chemie 1910 г. Band N. Здѣсь рассмотрѣна такъ называемая Forcier-Krankheit, т. е. болѣзнь отъ перенапряженія, отъ переутомленія. Авторы приходятъ къ общему заключенію, что многіе металлы, встрѣчаемые въ ежедневной жизни, находятся въ состояніи *ложнаго равновѣсія* (метастабильномъ). Измѣненіе температуры и прививка, т. е. прикосновеніе съ металломъ, частицы котораго находятся при этой температурѣ въ устойчивомъ равновѣсіи, могутъ нарушить это ложное равновѣсіе, тогда строеніе металла измѣняется, переходитъ въ болѣе устойчивое. Конечно, если такой переходъ произойдетъ во время службы, то это съ практической точки зрѣнія равносильно полному разрушенію.

<sup>3)</sup> См. Muir. On the Recovery of Iron from Overstrain въ Engineer. 28 Apr. 1899.

<sup>4)</sup> Это явленіе давно было найдено Эрдманомъ (1851 г.), а послѣ него подробно изслѣдовано Фритше, а потомъ въ 1881 г. Морковниковымъ. Болѣе новое изслѣдованіе произвелъ Ernst Cohen; см. въ Revue de Métallurgie, № 4.

Наиболѣе неблагопріятныя условія работы, вызывающія скорѣе всего, и притомъ значительную, усталость въ металлахъ, не таковы какъ для людей, и отчасти даже противоположны имъ. Однообразіе работы, неподвижность при ней почти невыносимы для человѣка, Стоять неподвижно на часахъ, поддерживая тяжелый грузъ (ранецъ, ружье)—самая непріятная работа для человѣка; всякое разнообразіе, возможность по временамъ снимать грузъ, облегчаетъ эту работу. Совершенно обратнo—неподвижность, отсутствіе перемѣнъ, постоянство нагрузки представляютъ наиболѣе благопріятныя условія для металла; при этихъ условіяхъ металлъ можетъ держать крупныя нагрузки въ теченіе долгаго времени, нисколько не уставая, сохраняя свою прежнюю прочность. Для металла вредно разнообразіе, измѣняемость нагрузки; если нагрузка къ нему то приложена, то снята, или если нагрузка по одному направленію замѣняется противоположной, напримѣръ, послѣ растяженія слѣдуетъ сжатіе, затѣмъ идетъ опять растяженіе, и эти перемѣны чередуются быстро одна за другой, повторяясь почти безъ перерыва сотни тысячъ и милліоны разъ, что нерѣдко приходится переносить частямъ машинъ. Сюда-же относятся попеременно чередующіеся изгибы или крученія, то въ ту, то въ другую сторону, и тому подобныя условія напряженія въ металлѣ. Такія чередующіяся напряженія металлы выносятъ дурно, могутъ выдерживать ихъ только въ случаѣ, если величины напряженій не превышаютъ сравнительно небольшихъ предѣловъ; въ случаѣ превышенія этихъ предѣловъ металлы скоро устаютъ, получаютъ внезапные изломы, разрушенія, при томъ *безъ предварительнаго предупрежденія*, т. е. безъ замѣтной на глазъ деформации, хотя-бы металлъ самъ по себѣ былъ очень пластичный и при лабораторномъ испытаніи на разрывной машинѣ разрывался только послѣ полученія значительнаго удлиненія, составляющаго 20, 30 и болѣе процентовъ первоначальной длины. Поэтому, кромѣ обыкновенной пробы металла на сопротивленіе разрыву, полезно сдѣлать еще пробу *на выносливость* (Endurance Test), т. е. на способность его выдерживать болѣе или менѣе долго перемѣнныя усилія.

Экспериментальное изучение явлений усталости металлов начато уже давно, а именно с половины прошлого столетия. Прежде всего начал такие опыты Фербернъ; затѣмъ идетъ работа Годчинсона, а потомъ (въ 60-хъ годахъ прошлого столетия) Вӱлеръ произвелъ обширныя изслѣдованія, результаты которыхъ постоянно цитируются и теперь. Не пересчитывая всѣхъ послѣдующихъ работъ по этому вопросу, замѣчу, что за послѣдніе годы замѣчается оживленіе интереса къ этому дѣлу; новыя работы, новые приемы изслѣдованія быстро появляются одинъ за другимъ. Такъ, на конгрессѣ по испытанію матеріаловъ, происходившемъ въ 1912 году въ Нью-Йоркѣ, доклады по вопросу объ усталости и выносливости были представлены слѣдующими лицами:

Stanton (въ англійской Національной Физической Лабораторіи), Roos of Hjelmräter, Kommers, Boudouard (при Collège de France), Lawson and Capp (термо-электрическіе приемы для изученія усталости) <sup>1)</sup>. Кромѣ докладовъ, представленныхъ на конгрессѣ, слѣдуетъ отмѣтить нѣсколько наиболее важныхъ работъ послѣдняго времени, а именно Stanton and Bairstow <sup>2)</sup>, Bairstow, <sup>3)</sup>. Turner, The Strength of Steels etc. <sup>4)</sup>. Upton and Lewis <sup>5)</sup>. Eden Rose and Cunningham. <sup>6)</sup>. Bertram Hopkinson. <sup>7)</sup>. Послѣдняя работа очень интересна, такъ какъ въ ней получился неожиданный результатъ относительно значенія скорости переменъ напряженій, частоты этихъ переменъ. Прежде думали, что для наступленія усталости имѣетъ значеніе только полное число переменъ, а не быстрота, или частота этихъ переменъ. Осборнъ Рей-

<sup>1)</sup> См. эти доклады въ отчетахъ Конгресса, а также въ Revue de Métallurgie за 1913 г. № 1.

<sup>2)</sup> Proc. Civ. Eng. Vol. 166 (1906 г.).

<sup>3)</sup> Philos. Trans. A. Vol. 210 (1911 г.).

<sup>4)</sup> Въ Engineering 1911 г. July 28 и слѣд.; обращаю вниманіе на эту очень важную работу, исполненную въ лабораторіи Кембриджскаго Университета. Тёрнеръ разсматриваетъ въ ней вопросы усталости, выносливости, а также вопросъ о критеріи прочности, т. е. теоріяхъ прочности.

<sup>5)</sup> American Machinist 1912, Nov. 9, Nov. 16.

<sup>6)</sup> Proceed. Inst. Mec. Eng. Ock. 20 1911 г.

<sup>7)</sup> Proc. Royal Soc. Lond. 1912 A vol 86 p. 131.

нольдс и Смитъ нашли, что *быстрота* перемѣнъ вліяетъ неблагоприятно, т. е. при частыхъ перемѣнахъ металлъ устаетъ отъ меньшаго абсолютнаго числа ихъ, чѣмъ при рѣдкихъ, медленныхъ перемѣнахъ. Послѣдующіе изслѣдователи (напримѣръ, Eden, Rose and Cunningham) не получили подтвержденія этого закона; и теперь многіе считаютъ, что для наступленія усталости требуется *опредѣленное абсолютное число перемѣнъ напряженій, независимо отъ ихъ частоты*. Если-бы это оказалось общимъ закономъ, то этимъ значительно упростились бы лабораторныя и заводскія испытанія по усталости, а именно, значительно сократилось-бы время для производства такихъ испытаній. Считаютъ нужнымъ для такого изученія свойствъ металла приложить къ нему не менѣе одного милліона перемѣнъ напряженій<sup>1)</sup>. При небольшой быстротѣ перемѣнъ, такое испытаніе требуетъ очень значительнаго времени — у Вёлера, который примѣнялъ 60—80 перемѣнъ въ минуту, иногда опытъ продолжался нѣсколько лѣтъ. Увеличивая частоту перемѣнъ, уменьшаемъ продолжительность опыта. При 500 циклахъ перемѣнъ въ минуту, для полученія милліона цикловъ требуется время около 33 часовъ. Уже у Осборна Рейнольдса число перемѣнъ въ минуту доходило до 2500. Гопкинсонъ пошелъ еще дальше, и въ его магнитной машинѣ испытываемый брусокъ попеременно растягивается и сжимается, подвергаясь такому циклу операций 7000 разъ въ минуту; слѣдовательно, для полученія одного милліона цикловъ перемѣнъ достаточно 2<sup>1</sup>/<sub>2</sub> часа.

Но опыты его показали, что такія частыя перемѣны гораздо менѣе опасны, чѣмъ медленныя. Такъ, для мягкой стали, содержавшей 0,18% углерода и 0,7% марганца, получилось: когда производилось около 1000 перемѣнъ напряженій въ минуту, то при разности напряженій до 30 тоннъ на квадратный дюймъ, достаточно было 5000 перемѣнъ, чтобы произвести разрушеніе; продолжительность опыта составляла около 50 минутъ. А на приборѣ Гопкинсона, гдѣ число перемѣнъ въ минуту составляетъ

---

<sup>1)</sup> Вёлеръ прилагалъ еще большее число перемѣнъ; въ одномъ опытѣ у него это число доходило до 132 000 000.

7000, когда разность напряжений была 32 тонны на квадратный дюймъ, требовалось для разрушенія отъ 2,8 миллионъ до 11,5 миллионъ перемѣнъ. Для полученія разрушенія на этомъ приборѣ требуется время не менѣе 400 минутъ. Слѣдовательно, несмотря на увеличеніе частоты перемѣнъ, время, потребное для разрушенія, значительно больше, чѣмъ на приборѣ, работающемъ съ небольшой частотой перемѣнъ. Значительное увеличеніе частоты здѣсь не только не ускоряетъ опыта, но, обратно, замедляетъ его въ 8 разъ, а иногда и еще больше.

Итакъ, вопросъ объ усталости оказывается сложнымъ, имѣющимъ много различныхъ сторонъ; каждая изъ нихъ требуетъ отдѣльнаго изслѣдованія и изученія. Здѣсь я ограничусь разсмотрѣніемъ только одной стороны, а именно связи усталости съ кристаллическимъ строеніемъ металловъ.

Постараюсь резюмировать то, что до сихъ поръ найдено въ этомъ отношеніи.

### Кристаллическое строеніе.

Всѣ металлы и сплавы, съ которыми намъ приходится имѣть дѣло въ техникѣ, не исключая даже и такихъ мягкихъ, какъ свинецъ, и въ литомъ, а также и въ кованномъ или тянутомъ состояніи имѣютъ кристаллическое строеніе. Современные металлурги или вовсе не признаютъ существованія аморфнаго состоянія въ металлахъ, или допускаютъ его появленіе лишь въ нѣкоторыхъ исключительныхъ случаяхъ. Профессоръ Юингъ, которому мы обязаны замѣчательнымъ разъясненіемъ сущности явленія усталости, въ своей работѣ 1899 года даже говорилъ: *«вѣроятно, ни одинъ металлъ ни при какихъ обстоятельствахъ не перестаетъ быть кристаллическимъ»*. Теперь нужно нѣсколько смягчить категоричность такого утвержденія.

За послѣдніе годы Veilby многократно указывалъ, что послѣ шлифовки и полировки, вся поверхность шлифа состоитъ изъ частицъ металла, имѣющихъ аморфное сложеніе, и что такое-же строеніе можетъ про-



явиться и внутри металла, вследствие скольжений и трения кристалловъ между собою.

Затѣмъ онъ принимаетъ, что въ чистомъ металлѣ на границѣ кристаллическаго зерна, т. е. на поверхности прикосновенія его со смежнымъ зерномъ, лежитъ какъ-бы тонкій слой цемента, состоящаго изъ того-же металла, но находящагося въ аморфномъ состояніи.

Къ этимъ взглядамъ присоединяются нѣкоторые выдающіеся металлурги, въ томъ числѣ Осмондъ, Юингъ и Розенгайнъ. Но, во всякомъ случаѣ, если и существуетъ аморфное состояніе, то въ очень небольшой массѣ металла.

При протравленіи металлическихъ шлифовъ для микроскопа верхній (аморфный) слой снимается, и металлъ обнаруживаетъ подъ микроскопомъ, что онъ состоитъ изъ отдѣльныхъ соприкасающихся зеренъ, каждое изъ которыхъ имѣетъ кристаллическое сложеніе. Зерна образуются вследствие того, что при остываніи отлитаго жидкаго металла кристаллизація начинается одновременно въ большомъ числѣ центровъ. Около каждаго центра нарастаетъ во всѣ стороны кристаллическое вещество; это и есть зерно; оно увеличивается, пока поверхность его не встрѣтится съ поверхностями другихъ смежныхъ нарастающихъ зеренъ. Поверхности встрѣчи и образуютъ контуры зерна. Эти поверхности имѣютъ форму случайную, произвольную; онѣ могутъ быть не плоскими, а кривыми. Онѣ вовсе не представляютъ правильныя грани кристалловъ, т. е. плоскія грани, имѣющія опредѣленныя наклоны и образующія тѣ опредѣленныя симметрическія формы кристалловъ, которыя такъ подробно изучены современной кристаллографіей.

Мы ясно представимъ себѣ сущность этихъ зеренъ, если возьмемъ правильный кристаллъ и произвольно обломаемъ его углы или испортимъ его поверхность. Тогда его уже не назовутъ *кристалломъ*, въ тѣсномъ, общепринятомъ значеніи этого слова. Но порча, обламываніе поверхности не измѣняетъ внутренняго строенія; это всетаки будетъ настоящее кристаллическое вещество, со всѣми его физическими свойствами, съ прежними

отношеніями къ свѣту, теплу, электричеству, магнетизму, съ опредѣленной ориентировкой частицъ. Таковы кристаллическія зерна, *кристаллиты*, изъ которыхъ состоятъ металлы.

Какъ мы увидимъ дальше, кристаллическое строеніе имѣетъ очень важное значеніе для явленій усталости, и потому необходимо изучить общія свойства такого вещества, по отношенію его къ деформациямъ.

Такое предварительное изученіе лучше сдѣлать не на металлахъ, кристаллы которыхъ очень малы, а на такихъ минералахъ, которые можно встрѣтить въ природѣ въ видѣ крупныхъ кристалловъ, удобныхъ для наблюденія.

### Явленія скольженія кристаллическаго вещества.

Въ кристаллахъ давно уже замѣчали явленія скольженія, или сдвига, происходящія безъ нарушенія цѣлости кристалла. Лучше всего они наблюдаются въ кристаллахъ исландскаго шпата и каменной соли, которые можно имѣть въ крупныхъ размѣрахъ и вполне прозрачными. Первые указанія, намеки на такія явленія въ исландскомъ шпатѣ имѣются еще у Бартолина (1670 г.), который раньше всѣхъ изучалъ двоякое преломленіе этого минерала, и у Гюйгенса (1678 г.). Затѣмъ послѣдовало довольно большое число работъ и открытій въ этой области <sup>1)</sup>.

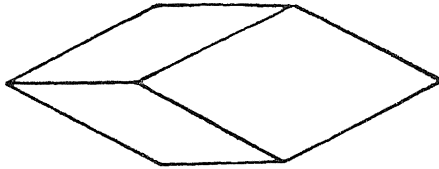
Среди всѣхъ этихъ работъ наиболѣе поразителенъ и ярокъ такъ называемый опытъ Баумгауэра (1879 г.), который В. Томсонъ называетъ «великолѣпнымъ открытіемъ» <sup>2)</sup>. Баумгауэръ далъ простой и легко удающійся

<sup>1)</sup> Объ этихъ явленіяхъ говорится почти во всѣхъ курсахъ кристаллографіи; наиболѣе подробно въ курсѣ; Liebisch, *Physikalische Krystallographie*. На русскомъ языкѣ имѣется обширная монографія по этому вопросу: В. И. Вернадскій, «Явленія скольженія кристаллическаго вещества», 1897 г., въ которой собрана масса фактовъ. Эта брошюра представляетъ отдѣльный оттискъ изъ Ученыхъ Записокъ Императорскаго Московскаго Университета. Отдѣлъ естественно-историческій, выш. 13.

<sup>2)</sup> «*Splendide decouverte*», см. статью Томсона въ *Comptes rendus*. Т. 109. p. 333.

способъ полученія кристаллическихъ двойниковъ исландскаго шпата при помощи механическаго давленія.

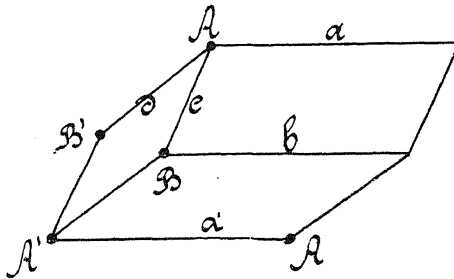
Двойники, т. е. два сросшихся симметрическихъ кристалла, которые такъ расположены взаимно, что одинъ представляетъ какъ-бы зеркальное изображеніе другого, нерѣдко встрѣчаются въ природѣ или получаются при кристаллизаци изъ растворовъ. Но при опытѣ Баумгауэра двойникъ получается давленіемъ изъ



Фиг. 1.

вполнѣ твердаго кристалла. Это явленіе такъ поразительно и имѣетъ такое важное значеніе для вопроса объ усталости, что я остановлюсь на немъ подробно.

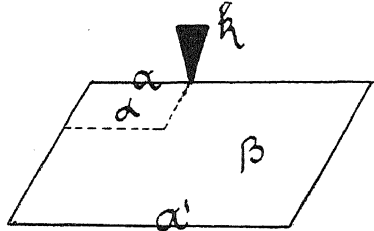
Извѣстно, что исландскій шпатъ представляетъ вполнѣ прозрачный кристаллъ, имѣющій въ простѣйшемъ случаѣ форму ромбоэдра, т. е. параллелепипеда, у котораго всѣ шесть граней представляютъ равные между собою ромбы (фиг. 1).



Фиг. 2.

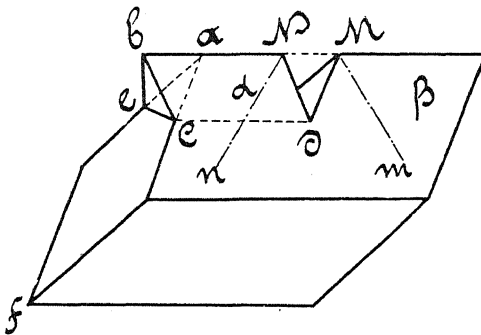
Плоскости этихъ ромбовъ суть плоскости спайности, и, раскалывая кристаллъ параллельно этимъ плоскостямъ, мы можемъ получить болѣе или менѣе вытянутые параллелепипеды, которые продолжаютъ называться ромбоэдрами, хотя уже у нихъ не всѣ шесть граней одинаковы (фиг. 2). Въ такомъ ромбоэдрѣ слѣдуетъ обратить вни-

маніе на тѣ двѣ вершины А, А', въ которыхъ сходятся три одинаковыхъ плоскихъ тупыхъ угла. Проведя черезъ А прямую, расположенную симметрично относительно реберъ а, с, d, получимъ направление *оптической оси* кристалла. Ребра а, а', называются *тупыми* ребрами ромбоэдра, ребро b, и параллельное ему, идущее черезъ В',—будутъ острые ребра ромбоэдра.



Фиг. 3.

Вотъ какъ производится опытъ Баумгауэра (фиг. 3). Поставимъ ромбоэдръ тупымъ ребромъ а' на подставку и будемъ надавливать тупымъ ножомъ к перпендикулярно на другое тупое ребро а (полезно примѣнить для



Фиг. 4.

этого небольшой винтовой прессъ). Тогда ножъ, постепенно входя въ кристаллъ, сдвинетъ влѣво часть кристалла  $\alpha$  и образуетъ въ лѣвой части двойникъ (фиг. 4).

Плоскость скольженія  $cd$  параллельна ребру а, т. е. имѣетъ совершенно опредѣленное направление относительно плоскостей спайности, ограничивающихъ ромбоэдръ. Уголъ сдвига, т. е. уголъ поворота части  $\alpha$ ,

имѣть совершенно опредѣленную величину, а именно 52,5 градуса, и грани  $сbe$ ,  $сеf$  образуютъ одинаковые углы съ плоскостью сдвига  $cd$ .

Изслѣдуя оптическія свойства сдвинутой части  $\alpha$ , Покольсъ нашель, что онѣ остались прежнія, но только направленіе оптической оси, которое до сдвига было  $Mm$ , теперъ перевернулось вмѣстѣ съ частью  $\alpha$  на такой-же уголъ, и новой оптической осью будетъ уже направленіе  $Nn$ . Однимъ словомъ, часть  $\alpha$  подверглась въ точности такой деформаци, которая называется *сдвигомъ*.

Если на боковой поверхности  $\alpha$  до деформаци былъ нарисованъ кругъ, то онѣ превратится въ эллипсъ, т. е. выполняется геометрическое условіе сдвига. Несмотря на значительный уголъ сдвига, несмотря на такое насильственное выворачиваніе частицъ, кристаллъ оказывается имѣющимъ прежнія оптическія свойства, онѣ по прежнему остается прозрачнымъ, и грани его даютъ прежнее зеркальное отраженіе. Единственная происшедшая отъ такого выворачиванія перемѣна состоитъ въ томъ, что поверхность вывернутого кристалла нѣсколько сильнѣе разѣдается кислотами, чѣмъ въ неизмѣненномъ кристаллѣ.

Обратнымъ давленіемъ можно вернуть часть  $\alpha$  въ прежнее положеніе. Но если съ нею повторить такую операцію—сдвигъ и возстановленіе формы—нѣсколько разъ, то часть  $\alpha$  совсѣмъ отколется по плоскости  $сde$ .

Вотъ въ чемъ состоитъ поразительное явленіе механическаго образованія двойниковъ. Оно встрѣчается и во многихъ другихъ минералахъ, но съ исландскимъ шпатомъ легче всего получить его, и теперъ опытъ Баумгауэра представляетъ самую обыкновенную демонстрацію, показываемую всегда на лекціяхъ по кристаллографіи и минералогіи.

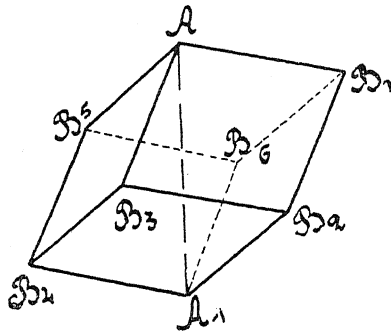
Съ точки зрѣнія ученія объ упругости въ этомъ опытѣ интересны два обстоятельства: а) Несомнѣнно при такой деформаци должны происходить весьма *значительныя* перемѣщенія частицъ тѣла, выведеніе ихъ изъ прежнихъ устойчивыхъ положеній въ совершенно иныя; и, несмотря на такія насильственныя перемѣщенія, мы

опять получаемъ компактное прозрачное тѣло, т. е. частицы успѣваютъ перестроиться въ новыя положенія устойчиваго равновѣсія. Это обстоятельство обратило на себя особое вниманіе В. Томсона. Естественно является желаніе болѣе подробно представить себѣ, какія движенія должны совершить частицы при такомъ перестраиваніи изъ одного устойчиваго положенія въ другое; само собою напрашивается сравненіе такихъ перемѣщеній съ тѣми, которыя производятся въ войскахъ при переходѣ изъ одного правильнаго строя въ другой. В. Томсонъ поэтому называетъ такое явленіе терминомъ: «молекулярная тактика кристалловъ». Въ указанной выше статьѣ онъ даетъ догадку относительно такой тактики. Принимая, что частицы тѣла суть эллипсоиды, онъ указываетъ, какіе деформаціи, повороты и перемѣщенія должны совершить эти эллипсоиды, чтобы воспроизвести опытъ Баумгауэра. Здѣсь мы имѣемъ еще одну изъ тѣхъ многочисленныхъ моделей, которыя предлагалъ этотъ знаменитый ученый для выясненія какъ упругихъ, такъ и разныхъ другихъ физическихъ явленій. Особый складъ ума Лорда Кельвина и другихъ ученыхъ англійской школы требовалъ непремѣнно ясной простой механической модели, безъ которой явленіе представлялось имъ темнымъ, непонятнымъ. Но, конечно, догадка В. Томсона есть не болѣе какъ *модель* въ современномъ физическомъ значеніи этого слова. Не слѣдуетъ думать, что она въ точности, или хотя приблизительно, представляетъ картину того, что происходитъ *въ действительности*, и не надо забывать, что если имѣемъ одну какую нибудь механическую модель, объясняющую нѣкоторое физическое явленіе, то навѣрное существуетъ еще множество другихъ механическихъ моделей, которыя тоже годны для объясненія того же явленія.

б) Опытъ Баумгауэра показываетъ намъ существованіе двухъ положеній устойчиваго равновѣсія для одного и того же тѣла (т. е. для деформированной части кристалла). Это какъ бы противорѣчитъ основной теоремѣ теоріи упругости, а именно теоремѣ Кирхгофа о единственности рѣшенія упругой задачи. Но такое противорѣчіе только кажущееся, такъ какъ теорема Кирхгофа от-

носится только къ очень малымъ (теоретически къ бесконечно малымъ) перемѣщеніямъ, а въ опытѣ Баумгауэра перемѣщенія вовсе не малы по сравненію съ размѣрами самаго тѣла. Основаніемъ вывода теоремы Кирхгофа служитъ заданіе, что потенциальная энергія упругаго тѣла есть квадратичная функція деформаций и что коэффициенты этой функціи суть величины *постоянныя*. Но для условій опыта Баумгауэра мы не можемъ считать эти коэффициенты постоянными, и слѣдовательно выводъ Кирхгофа не примѣнимъ къ этому случаю.

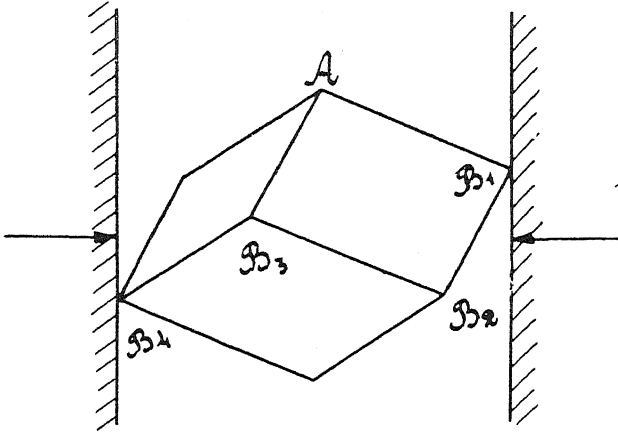
Въ опытѣ Баумгауэра, въ той формѣ, какъ онъ былъ выше описанъ и изображенъ на фиг. 4, деформации подвергается не весь кристаллъ, а только часть его, меньшая половины. Но можно такъ видоизмѣнить опытъ,



Фиг. 5.

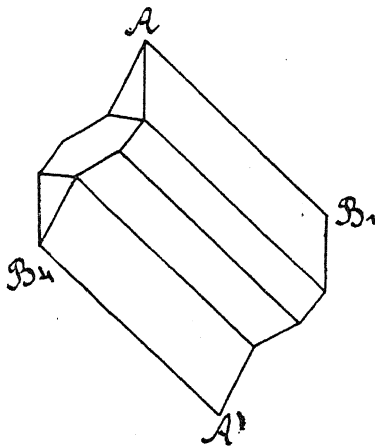
что указанной деформации подвергнется весь кристаллъ, весь ромбоэдръ известковаго шпата. Такую форму опыта придумалъ Мюгге. Для объясненія ея возьмемъ правильный ромбоэдръ, ось котораго есть  $AA_1$  (фиг. 5). Въ немъ нужно различать главные или правильные трехгранные углы  $A, A_1$  отъ среднихъ угловъ  $B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6$ , (правильными называются тѣ, гдѣ сходятся три *равныхъ* плоскихъ угла). Если давить двумя площадками на два противоположныхъ боковыхъ угла  $B_1, B_4$  (фиг. 6), то получится сначала такая деформация, какъ на фиг. 7, а затѣмъ при продолжающемся давленіи весь кристаллъ

выворотится, и мы получимъ ромбоэдръ, у котораго теперь  $B_1, B_4$  главные углы, а  $A, A'$ —сдѣлаются боковыми



Фиг. 6.

(средними) углами <sup>1)</sup>. Такимъ образомъ данный ромбоэдръ к (фиг. 8) превратился опять въ ромбоэдръ, но въ



Фиг. 7.

другой, съ другими осями симметріи. Оптическая ось его теперь будетъ  $B, B'$ , вмѣсто первоначальной  $A, A'$ .

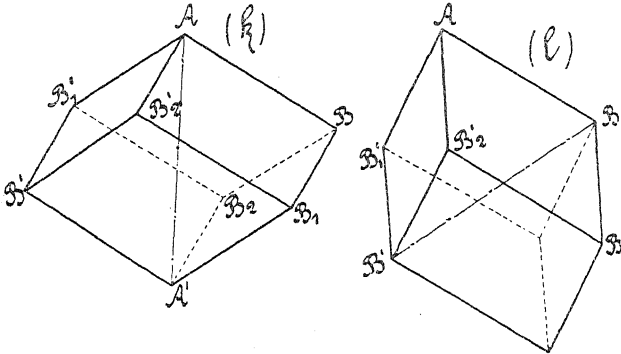
<sup>1)</sup> Но при такомъ опытѣ почти всегда въ кристаллѣ получится много трещинъ.



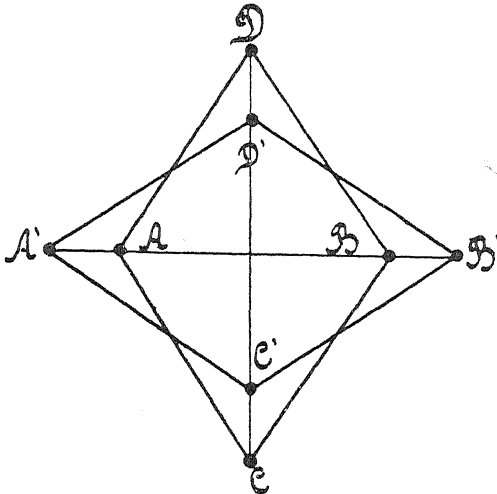
Прежній ромбоэдръ превратился въ свой двойникъ, въ зеркальное изображеніе прежней формы <sup>1)</sup>.

**Множественные двойники.**

При повтореніи указанныхъ операций могутъ произойти множественные двойники, схема образованія которыхъ



Фиг. 8.



Фиг. 9.

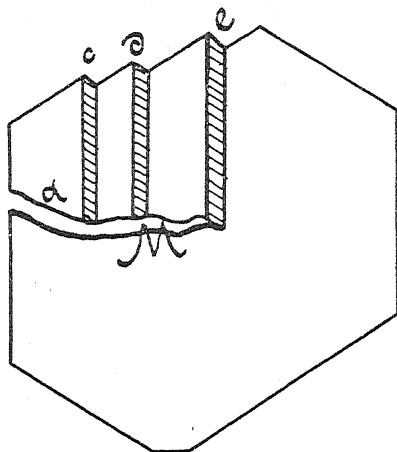
представлена на фиг. 10. Для примѣра я беру у Liebisch'a (S. 114) образчикъ кристалла (фиг. 11) моноклинической

<sup>1)</sup> См. у Liebisch'a, *Physikalische Krystallographie*. S. 115, примѣръ для кристалла ангидрита (т. е. безводной сѣрноокислой извести). Призма (кристаллъ ромбической системы) съ ромбическимъ основаніемъ ABCD (фиг. 9) можетъ быть механической деформашіей превращена въ призму съ основаніемъ A'B'C'D'.

системы, въ которомъ давлениемъ ножа у М образованы двойники с, d, e; при этомъ получилась трещина а. Многократные двойники, обыкновенно микроскопическихъ размѣровъ, часто встрѣчаются въ горныхъ породахъ; онѣ образовались вслѣдствіе давленій, которымъ подвергаются породы въ земной корѣ. Когда ихъ очень много, такъ что весь кристаллъ состоитъ какъ бы изъ тонкихъ пластинокъ, сросшихся между собою по одноименнымъ кристаллографическимъ плоскостямъ и каждая пластинка, какъ



Фиг. 10.



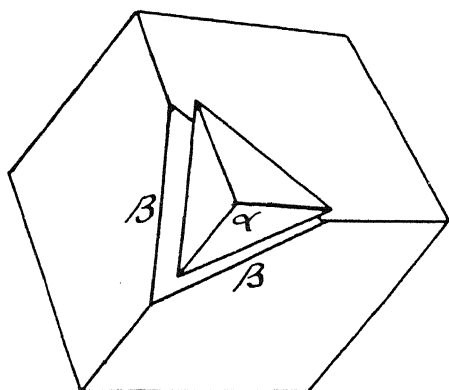
Фиг. 11.

индивидъ, образуетъ опредѣленный уголь съ пластинкой, представляющей сосѣдній индивидъ, то такое образование называется полисинтетическимъ повторнымъ двойникомъ. Обыкновенно эти пластинки такъ тонки, что отдѣльные индивидуумы видны лишь подъ микроскопомъ въ шлифахъ, какъ тонкая штриховка <sup>1)</sup>).

Образованіе двойниковъ мы будемъ называть *первой формой скольженія* въ минералахъ. Это не единственная форма скольженія въ минералахъ, а еще чаще ея встрѣчается другая, которую мы будемъ называть *второй фор-*

<sup>1)</sup> См рисунки у Hirschwald'a, Handbuch der bautechnischen Gesteinsprüfung. I Band. Напримѣръ, плагиоклазъ, который въ поляризованномъ свѣтѣ показываетъ «äusserst markante polysynthetische Zwillingsbildung», или диоритъ, въ которомъ кристаллъ полевого шпата „eine feine Streifung zeigt, hervorgerufen durch polysynthetische Zwillingsbildung“.

мой. Лучшимъ образчикомъ, гдѣ эта форма представляется вполне наглядно, въ крупномъ видѣ, можетъ служить кристаллъ исландскаго шпата, имѣющійся въ музеѣ Московскаго Университета и приведенный въ книгѣ академика Вернадскаго на фиг. 1. Это крупный прозрачный ромбоэдръ, на одномъ изъ трехгранныхъ угловъ котораго, какъ показано на нашей фиг. 12, сдвинуть тетраэдръ  $\alpha$ , такъ что образовались ясныя полоски скольженія  $\beta, \beta_1$  безъ нарушенія связи этого тетраэдра съ остальной массой кристалла. Если не обращать вниманія на нѣкоторыя второстепенныя подробности деформации этого кристалла (на нѣкоторое крученіе или пово-



Фиг. 12.

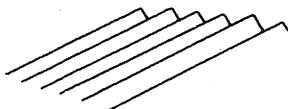
рачиваніе части  $\alpha$ ), то здѣсь мы имѣемъ прекрасный образецъ деформации, называемой въ нѣмецкой литературѣ—Translation. Это поступательное передвиженіе безъ поворота на нѣкоторую конечную величину, но безъ нарушенія связи.

На представленномъ образцѣ мы имѣемъ *одиночное* передвиженіе; но чаще встрѣчаются многократныя передвиженія частей кристалла одной по другой, по параллельнымъ плоскостямъ, въ родѣ того, какъ показано на схемѣ фиг. 13.

Это явленіе описывается минералогами, напримѣръ, въ слѣдующихъ выраженіяхъ: «въ средней части кристалла (при сжатіи его вдоль по оси) образовалось утолщеніе,

состоящее изъ цѣлаго ряда узкихъ плоскостей, образующихъ рядъ входящихъ и исходящихъ двугранныхъ угловъ». «Иногда эти узкія плоскости ясно видны на глазъ; иногда-же онѣ представляются только какъ штрихи. Въ извѣстныхъ случаяхъ этотъ видъ скольженія переходитъ въ трещины».

Описанныя явленія скольженія легче всего наблюдаются въ исландскомъ шпатѣ и въ каменной соли; оба эти вещества легко могутъ быть получены въ видѣ крупныхъ прозрачныхъ кристалловъ, и потому очень удобны для опытовъ и демонстрацій. Но область явленій скольженія не ограничивается этими двумя минералами, а это явленіе широко распространено по всему царству



Фиг. 13.

минераловъ. Академикъ Вернадскій, въ цитированной выше книгѣ своей, указываетъ, что въ настоящее время для семидесяти семи различныхъ кристаллическихъ веществъ «съ большей или меньшей точностью констатировано явленіе скольженія». Оно встрѣчается во *всѣхъ* кристаллическихъ системахъ — правильной, квадратной гексагональной, ромбической, моноклинической и триклинической. Его наблюдали какъ для полногранныхъ формъ (голоэдрическихъ), такъ и для неполногранныхъ (геміэдрическихъ, гемиморфныхъ, тетартоэдрическихъ). Оно существуетъ и у очень мягкихъ кристалловъ (напримѣръ, каменная соль) и у очень твердыхъ (кварцъ, топазъ, корундъ). Скольженіе это вызывается, кромѣ механическаго дѣйствія, т. е. неравнобѣрнаго давленія, еще и при посредствѣ неравнобѣрнаго нагрѣванія. Съ большой степенью вѣроятности можно ожидать, что такія-же явленія могутъ быть и во многихъ другихъ кристаллахъ, кромѣ указанныхъ семидесяти семи и что вообще такая склонность къ скольженію представляетъ общее свойство кристаллическаго вещества: «подъ влія-

ніемъ внѣшней силы. твердое, однородное вещество получаетъ способность... перемѣщаться, двигаться по извѣстнымъ направленіямъ, *безъ разрыва связи между частицами...* Эти направленія... находятся въ тѣсной и опредѣленной связи съ симметріей строенія кристалла». «Какъ въ жидкости, подъ вліяніемъ нарушенія внѣшнихъ условій, чрезвычайно легко происходятъ скольженія, сдвиги *по вѣсьмъ возможнымъ направленіямъ*, такъ въ твердомъ веществѣ они могутъ идти лишь по *немногимъ опредѣленнымъ* направленіямъ. Не разрушая связи между частями твердаго тѣла, они въ то же время мѣняютъ его внутреннее строеніе <sup>1)</sup>).

Конечно, все это мы должны встрѣтить и у металловъ. У нихъ должны оказаться скольженія двухъ родовъ: второго рода, т. е. безъ поворота, и перваго рода, т. е. съ поворотомъ, съ образованіемъ двойниковъ.

Нѣкоторыя вещества, и въ числѣ ихъ извѣстные металлы, даютъ скольженія съ большой легкостью: напримеръ, академикъ Вернадскій характеризуетъ графитъ, какъ необыкновенно способное къ скольженію вещество. Онъ-же говоритъ: «кристаллы висмута даютъ чрезвычайно легко явленія скользянія, совершенно аналогичныя найденнымъ Баумгауэромъ для кальцита»; «явленія скользянія выражены также рѣзко въ сурьмѣ»; «вещество сурьма до такой степени подвижно при малѣйшихъ измѣненіяхъ внѣшнихъ условій, что мы едвали можемъ имѣть дѣло съ недеформированными кристаллами».

### Явленія скользянія въ металахъ.

Такъ какъ всѣ металлы имѣютъ кристаллическое строеніе, то при деформациі ихъ должны получиться явленія скользянія, указанныя выше, какъ общія для всякаго кристаллическаго вещества. Нужно ожидать, что мы встрѣтимъ въ металахъ и скользянія перваго рода, и скользянія второго рода. Но такъ какъ кристаллическія зерна металловъ почти всегда очень мелки, то явленія

<sup>1)</sup> Изъ упомянутой статьи академика Вернадскаго. Курсивъ мой.

скольженія въ металлахъ приходится обыкновенно разсматривать подъ микроскопомъ, при сильномъ увеличеніи <sup>1)</sup>. Въ особенности значительныя увеличенія требуютъ желѣзо и сталь, отличающіяся мелкостью своихъ зеренъ. Для нихъ нужно линейное увеличеніе въ нѣсколько сотъ разъ, иногда до 800—1000 діаметровъ. Для мѣди, свинца и разныхъ сплавовъ иногда достаточно увеличенія въ 80—100—150 діаметровъ. Предыдущее разсмотрѣніе явленій въ исландскомъ шпатѣ, каменной соли и другихъ минералахъ служитъ намъ подготовкой, указаніемъ на то, чего можно ожидать, что мы должны увидѣть въ микроскопъ; описанныя явленія въ минералахъ даютъ прямо на глазъ, непосредственно, *макроскопически* то, что для металловъ мы увидимъ *микроскопически*.

### Изученіе подъ микроскопомъ.

Изученіе подъ микроскопомъ явленій скольженія въ металлахъ при деформацияхъ началось сравнительно недавно. Началъ это изученіе профессоръ Кембриджскаго Университета Юингъ вмѣстѣ съ Розенгайномъ, въ 1899 году <sup>2)</sup>. Изслѣдуемая поверхность металлической полоски была очень хорошо отполирована (какъ это всегда дѣлаютъ при металлографическихъ изслѣдованіяхъ подъ микроскопомъ) и затѣмъ протравлена, чтобы уничтожить слой изъ мелкихъ частицъ металла, образующихся при полировкѣ <sup>3)</sup>. Тогда подъ микроскопомъ на поверхности металла сдѣлались ясно видны очертанія полигональных зеренъ, т. е. отдѣльныхъ кристаллитовъ. Выбравши одно изъ этихъ зеренъ, въ микроскопъ можно было слѣдить за этимъ зерномъ, во время растяженія или сжатія полоски металла, и наблюдать, какія происходятъ перемѣны въ зернѣ.

---

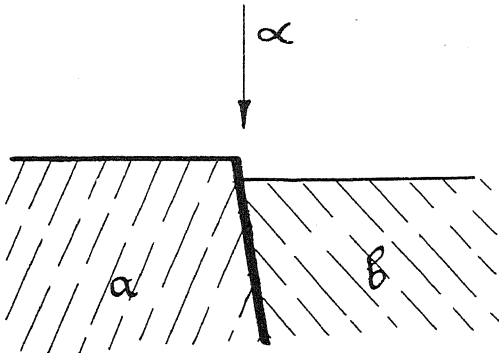
<sup>1)</sup> Иногда удается получить металлъ въ формѣ крупныхъ кристалловъ, и прямо повторять съ ними такіе-же опыты образованія двойниковъ, какъ сдѣланные Баумгауэромъ и Рейшемъ съ кальцитомъ. Такъ Мюгге повторилъ ихъ для сурьмы и висмута.

<sup>2)</sup> Phil. Trans. Vol. 193.

Также въ Proc. Roy. Soc. Vol. 65.

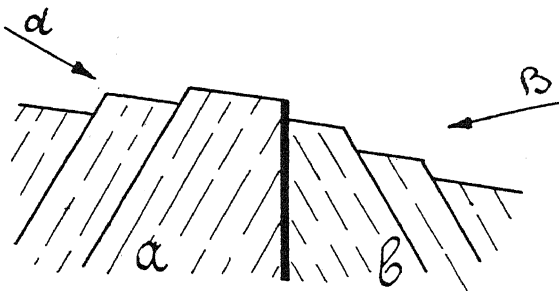
<sup>3)</sup> Иногда дѣлались наблюденія безъ протравленія поверхности.

Оказалось, что при деформации оно покрывается рядом темных линий, или тонких полосок. Явление это объясняется тѣмъ, что въ металлѣ появляются внутри зеренъ многочисленныя сдвиги, или скольженія такого вида, какъ названныя нами скольженіями второго рода. Представимъ себѣ (фиг. 14), что а и в два смежныхъ



Фиг. 14

кристаллита; пунктирная штриховка въ нихъ показываетъ возможныя для нихъ плоскости кристаллическаго скольженія, направленныя конечно неодинаково въ смежныхъ зернахъ, такъ какъ въ каждомъ зернѣ направленіе кристаллическихъ осей и возможныхъ плоскостей скольженія—случайны и неодинаковы. При деформации получатся



Фиг. 15.

скольженія, и плоскія поверхности зеренъ превратятся въ ступенчатая (фиг. 15). Смотря въ микроскопъ, установленный по прежнему, съ освѣщеніемъ направленнымъ нормально къ первоначальной полированной поверхности зеренъ, мы увидимъ эти ступеньки въ формѣ темныхъ

линій, т. е. узенькихъ полосочекъ. Появленіе такихъ линій констатируетъ, что произошли сдвиги.

Для подтвержденія того, что здѣсь имѣемъ именно сдвиги, прежнее нормальное освѣщеніе было замѣнено боковымъ. При освѣщеніи по направленію  $\alpha$  ярко освѣщаются ступеньки зерна  $a$ , и соотвѣтствующія имъ темныя линіи дѣлаются свѣтлыми. Освѣщеніе по направленію  $\beta$  дѣлаетъ свѣтлыми линіи зерна  $b$ .

Можно, измѣняя направленіе, по которому падаетъ свѣтъ, по произволу превращать темныя линіи въ свѣтлыя и обратно.

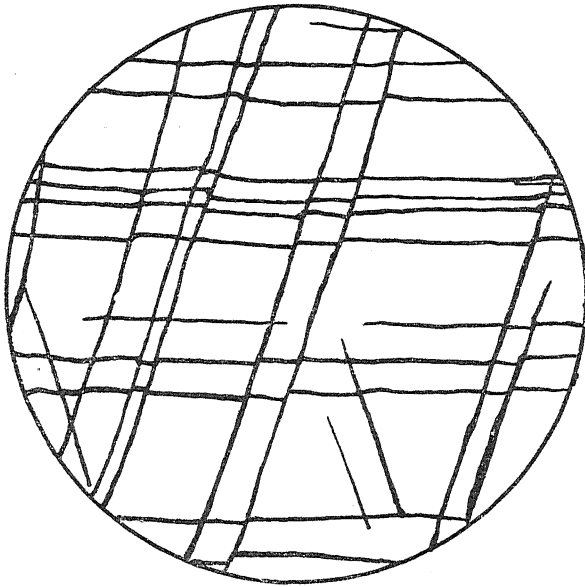
Розенгайнъ еще иначе подтвердилъ, что здѣсь имѣемъ дѣло со ступенчатыми сдвигами. Послѣ деформациі онъ покрылъ поверхность испытаннаго металла (жельза) толстымъ слоемъ электролитической мѣди, и затѣмъ разрѣзалъ испытанную пластинку по плоскости нормальной къ прежней полированной поверхности. Въ разрѣзѣ, подъ микроскопомъ можно было видѣть, что границы между жельзомъ и мѣдью имѣютъ зубчатое очертаніе, совершенно какъ показываютъ ступеньки на фиг. 15.

Итакъ, при пластической деформациі металловъ получаются многочисленныя сдвиги или скольженія второго рода, т. е. скольженія безъ поворота. Они начинаются съ нѣкоторыхъ зеренъ, конечно, съ тѣхъ, у которыхъ направленіе возможныхъ плоскостей скольженія относительно растягивающей или сжимающей силы наиболѣе благопріятны для появленія скольженія. Съ увеличеніемъ растягивающей (или сжимающей) силы, черныя линіи начинаютъ показываться и въ другихъ зернахъ, гдѣ направленія возможныхъ плоскостей скольженія менѣе благопріятны для сдвига. По мѣрѣ увеличенія растягивающей силы, число темныхъ линій увеличивается.

Иногда въ одномъ и томъ же зернѣ появляется не одна система параллельныхъ темныхъ линій, а двѣ взаимно пересѣкающіяся, какъ это показано схематически на фиг. 16 для свинца (увел. 1000 D), въ которомъ линіи сдвига получаютъ особенно правильныя, прямыя и взаимно параллельныя. Появленіе двухъ или нѣсколь-



кихъ системъ линій указывасть, что въ кристаллѣ имѣются два или нѣсколько возможныхъ направлений скольженія, соотвѣтственно его кристаллической формѣ,— наприимѣръ, одно параллельное гранямъ куба, другое— параллельное гранямъ октаэдра, если имѣемъ дѣло съ кристалломъ правильной системы <sup>1)</sup>).



Фиг. 16.

Во всякомъ случаѣ мы здѣсь имѣемъ дѣло со скольженіемъ второго рода, которое ясно характеризуется словами Юинга: «Это явленіе *разрывное*; это не однородное скольженіе, а рядъ конечныхъ сдвиговъ, при которыхъ часть кристалла, заключающаяся между однимъ сдвигомъ и другимъ, смежнымъ съ первымъ, ведетъ себя какъ жесткое твердое тѣло». «Происшедшій сдвигъ за-

---

<sup>1)</sup> По своимъ кристаллическимъ формамъ металлы, большею частью, принадлежать къ правильной системѣ. Сюда относятся желѣзо во всѣхъ трехъ своихъ видоизмѣненіяхъ  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ , мѣдь, серебро, золото, платина, иридій, осмій, хромъ, никкель.

Нѣкоторые изъ извѣстныхъ металловъ кристаллизуются въ гексагональной системѣ (цинкъ, кадмій, магній).

ключаетъ въ себѣ потерю работы, израсходованной *не-обратимымъ* образомъ».

Кромѣ такого скольженія второго рода, Юингъ и Розенгайнъ неоднократно замѣчали въ металлахъ при ихъ деформации еще и скольженіе первого рода, т. е. образованіе двойниковъ (сдвиги съ поворотомъ).

Въ металлахъ двойники микроскопическіе. Они появляются не у всѣхъ металловъ. Указанные изслѣдова-

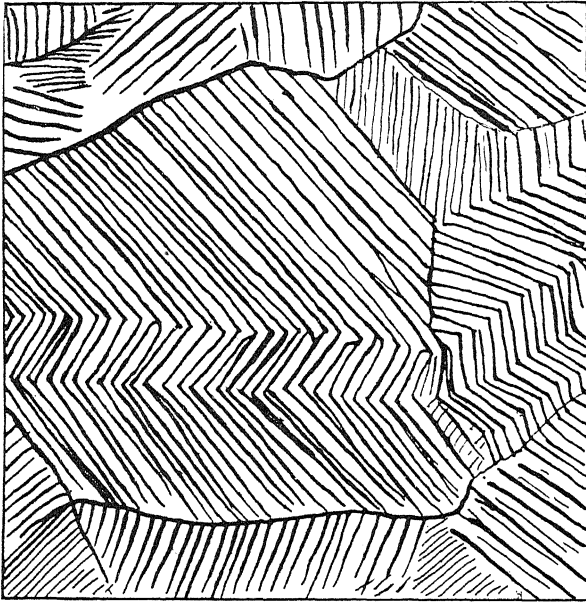


Фиг. 17.

тели нашли ихъ послѣ деформации у красной мѣди, золота, никкеля, серебра, кадмія, свинца, олова, цинка. Для примѣра я привожу два схематическихъ рисунка. Первый (фиг. 17) изображаетъ двойники *красной мѣди* <sup>1)</sup> при увеличеніи около 1000 D, а на второмъ (фиг. 18) представлены двойники въ такъ называемомъ *инварѣ*, т. е. сплавѣ желѣза съ большимъ количествомъ никкеля

<sup>1)</sup> Взятъ изъ майской лекціи Юинга. Journal of the Inst. of Metals 1912. Vol VIII.

(36<sup>0</sup>/0)<sup>1)</sup> Въ обоихъ этихъ примѣрахъ двойники существовали въ металлахъ раньше ихъ растяженія на разрывной машинѣ, т. е. двойники образовались вслѣдствіе деформаций, которымъ подверглись металлы при ихъ изготовленіи. Послѣ небольшого растяженія на машинѣ получились многочисленныя полоски скольженія, направ-



Фиг. 18.

ленія которыхъ очень ясно проявили имѣвшіеся уже прежде двойники въ формѣ поперечной штриховки на нихъ.

Желѣзо въ обыкновенномъ его видоизмѣненіи, т. е. желѣзо  $\alpha$  по современной металлографической номенклатурѣ при обыкновенной температурѣ не даетъ двойниковъ, а также не даетъ ихъ и желѣзо  $\beta$ . Но двойники легко образуются у такъ называемаго  $\gamma$  желѣза. Для чистаго желѣза такая форма его получается только при высокой температурѣ, при накаливаніи. Но если имѣемъ

<sup>1)</sup> Взять изъ статьи Osmond et Cartaud. Sur la cristallisation du fer. Revue de Métal. 1906. Tome III p. 687.

сплавъ желѣза съ большимъ количествомъ никкеля (напримѣръ, около 25<sup>0</sup>/о) или марганца (около 10<sup>0</sup>/о), образующихъ съ желѣзомъ твердые растворы, то форма  $\gamma$  сохраняется и при обыкновенной температурѣ, а потому въ этихъ сортахъ стали при деформации образуются двойники въ большомъ количествѣ. Есть указанія, что желѣзо  $\alpha$  даетъ двойники при температурѣ жидкаго воздуха, въ особенности при *деформации ударомъ* <sup>1)</sup>.

Чтобы видѣть двойники въ чистомъ желѣзѣ формы  $\gamma$ , нужно растягивать его при высокой температурѣ (около 1100<sup>0</sup>—1200<sup>0</sup>) и принять мѣры къ тому, чтобы поверхность шлифа не покрылась слоемъ окисла и чтобы сохранилась та структура, которую желѣзо имѣетъ при высокой температурѣ. Это было достигнуто при слѣдующемъ замѣчательномъ опытѣ, сдѣланномъ Розенгайномъ и Гэмфри <sup>2)</sup>. Шлифованная полоска желѣза растягивалась пружиной въ пустотѣ, гдѣ степень разрѣженія превосходила то разрѣженіе, которое примѣняется въ лампочкахъ накаливанія. Указанная пластинка накаливалась электрическимъ токомъ, при чемъ, вслѣдствіе теплопроводности, по длинѣ пластинки устанавливалась неодинаковая температура, а именно: въ серединѣ пластинки была температура, которая отвѣчаетъ формѣ  $\gamma$  (отъ 1100<sup>0</sup>—1200<sup>0</sup>), далѣе къ краямъ температура понижалась сначала до 750<sup>0</sup>, т. е. желѣзо должно было перейти въ форму  $\beta$ , и, наконецъ, еще дальше къ краямъ температура понижалась до 700<sup>0</sup> и ниже, т. е. желѣзо должно было перейти въ форму  $\alpha$ .

Послѣ полного остыванія изслѣдуемой пластинки въ пустотѣ, она была поставлена подъ микроскопъ, при чемъ оказалось:

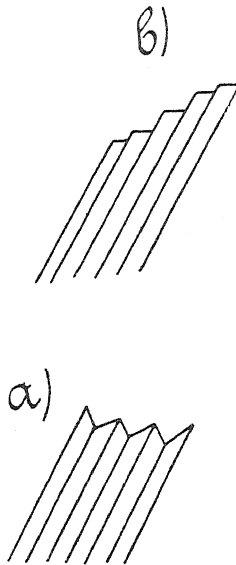
- 1) въ области желѣза  $\alpha$  получились многочисленныя полоски скольженія,
- 2) въ области желѣза  $\gamma$ , кромѣ полосокъ скольженія, появились двойники,
- 3) въ области желѣза  $\beta$  не получалось ни тѣхъ ни

<sup>1)</sup> См. ст. Robin въ *Revue de Métallurgie*. 1911. VIII p. 439.

<sup>2)</sup> См. его лекцію о стали въ *Proc. Inst. Mec. Eng.* 1911. Также *Proc. Roy. Soc.*

другихъ; это объясняется тѣмъ, что желѣзо  $\beta$  значительно жестче, чѣмъ  $\alpha$  и  $\gamma$ , и пластичность его, даже при высокой температурѣ не велика.

Нѣкоторые металлы съ особой легкостью или готовностью образуютъ двойники. 1) Такова красная мѣдь. Юингъ говоритъ, что если проковать брусокъ красной мѣди и затѣмъ изготовить изъ него шлифъ,



Фиг. 19.

то иногда все поле зрѣнія микроскопа оказывается наполненнымъ двойниками, хотя доковки ихъ не было.

Итакъ, и въ металлахъ мы, какъ и слѣдовало ожидать, встрѣчаемъ двѣ формы скольженія, которыя схематически изображены (на фиг. 19 *a* и *b*)<sup>2)</sup>. Надо по-

1) «Twin readily» говоритъ Розенгайнъ въ своихъ лекціяхъ о стали.

2) Явленія, замѣчаемыя подъ микроскопомъ, я вездѣ изображаю лишь схематически. Желаящіе видѣть явленія скольженія на настоящихъ микрограммахъ, сфотографированныхъ съ микроскопическихъ объектовъ, могутъ найти прекрасные образцы въ лекціи Юинга и Розенгайна, Phil. Trans. A. V 193 (1900) и въ лекціяхъ профессора Юинга, напечатанныхъ въ The Journal of the Institute of Metals T. VIII. Много прекрасныхъ микрограммъ приложено къ лекціямъ о стали, читаннымъ Розенгайномъ въ англійскомъ обществѣ Инженеръ-Механиковъ. См. Proc. Inst. Mec. Eng. 1911.

лагать, что въ кристаллическомъ веществѣ, склонномъ къ скольженію по извѣстнымъ параллельнымъ направле- ніямъ, произойдетъ та изъ двухъ формъ скольженія, которая представитъ меньшее сопротивленіе данной де- формирующей силѣ, въ зависимости отъ ея направленія.

### Опыты Фауста и Таманна.

Изъ числа послѣдующихъ работъ, которыя подтвер- дили главные выводы Юинга и Розенгайна, мы оста- новимся на недавней работѣ, исполненной въ Гёттинген- скомъ Университетѣ, Фаустомъ и профессоромъ Таман- номъ <sup>1)</sup>. Приготовивъ изъ металла кубъ, они одну изъ граней его полировали до высокой степени совершенства (Hoch Glanzpolitur, конечно, въ томъ родѣ, какъ для металлографическихъ шлифовъ); эту поверхность раз- сматривали въ микроскопъ въ то время, какъ кубъ подвергался постепенно увеличивающемуся давленію (по- добно этому изучали и растяженіе). Во время опыта от- мѣчали ту величину нагрузки, при которой *только что начинала исчезать высокая степень зеркальной поли- ровки*. Эту нагрузку они называютъ низшимъ предѣ- ломъ упругости. Она, вѣроятно, отвѣчаетъ тому, что мы называемъ *критическимъ давленіемъ*. Высшимъ предѣломъ упругости Таманъ и Фаустъ называютъ то, что мы назы- ваемъ нагрузкой, вызывающей состояніе текучести <sup>2)</sup>, т. е. когда получается непрерывная деформация, теченіе ме- талла, безъ увеличенія соотвѣтствующаго напряженія, при чемъ металлъ потерялъ основное свойство твердаго

<sup>1)</sup> Eine Methode zur Bestimmung der unteren und oberen Elasticitätsgrenzen etc. въ Zeit. f. phys. Chemie. Bd. 75 (1911).

<sup>2)</sup> Терминологія В. Л. Кирпичева нѣсколько отличается отъ установившейся за послѣднее время. Обыкновенно названіе «предѣлъ текучести» приурочиваютъ къ состоянію металла, сопровождающему появленіе первыхъ остаточныхъ деформаций, что отмѣчается первымъ горизонтальнымъ (короткимъ) участкомъ на диа- граммѣ. Этотъ участокъ В. Л. Кирпичевъ называетъ «критическимъ періодомъ», названіе же «текучесть» относитъ къ второму горизон- тальному участку диаграммы, отвѣчающему «временному сопротивле- нію» по обычной терминологіи. (Примѣч. Ред.)

тѣла—съ увеличеніемъ деформации уравниваются все большія и большія напряженія,—и сдѣлался въ отношеніи деформации похожимъ на жидкость.

Таманнъ и Фаустъ нашли, что, при достиженіи низшаго предѣла упругости, подъ микроскопомъ появляются въ зернахъ темныя линіи того же рода, какъ у Юинга, т. е. линіи или *полосы скольженія*. Они нашли, что низшій предѣлъ упругости одинаковъ для случаевъ растяженія и сжатія, какъ и должно быть, если этотъ предѣлъ связанъ съ появленіемъ сдвиговъ, которые имѣютъ одинаковое отношеніе къ растяженію и къ сжатію. Изъ подробностей отмѣтимъ, что для нѣкоторыхъ металловъ, незадолго до низшаго предѣла упругости, слышатся звуки, подобныя всѣмъ извѣстному крику олова. Это замѣчено для цинка, магнія, кадмія; звукъ, конечно, связанъ съ появленіемъ остающихся сдвиговъ. Еще интересно наблюденіе Фауста и Таманна, что когда, кромѣ прежняго осевого сжатія куба, прибавлялось еще гидростатическое давленіе на кубъ, т. е. одинаковое со всѣхъ сторонъ, то никакого измѣненія въ величинѣ низшаго предѣла упругости не происходило, хотя давленіе продолжалось долго, иногда до двухъ мѣсяцевъ. Это, конечно, происходитъ вслѣдствіе того, что гидростатическое давленіе не можетъ произвести сдвига <sup>1)</sup>.

### Пластическія деформации.

Указанныя явленія скольженія происходятъ при каждой пластической деформации. Они объясняютъ возможность *значительныхъ* пластическихъ деформаций для кристаллическихъ тѣлъ. Такія деформации происходятъ изъ накопленія сдвиговъ. И такъ какъ сдвиги перваго и втораго рода происходятъ въ кристаллахъ безъ разрыва или разъединенія, то пластическія деформации могутъ достигать значительной величины. Такимъ обра-

<sup>1)</sup> Это послѣднее наблюденіе представляетъ еще одинъ изъ аргументовъ въ пользу такъ называемой англійской теоріи прочности, которая считаетъ, что величина *сдвига*, опредѣляетъ условіе прочности.

зомъ, кристаллическое строеніе вещества не только не уничтожаетъ для него возможности пластическихъ деформаций, но, наоборотъ, именно кристаллическое сложеніе, общія свойства кристаллическаго вещества, способность его давать скольженія, дѣлають возможными значительныя пластическія деформации. Здѣсь мы подошли къ старому вопросу физической кристаллографіи. Давно уже минералогіи задавали себѣ вопросъ: можетъ ли *кристаллъ* получить *пластическую*, остающуюся деформацию, — или для кристалла допустимы только очень небольшія упругія измѣненія, *исчезающія* немедленно съ прекращеніемъ дѣйствующей силы? Въ прежнее время на этотъ вопросъ всегда отвѣчали: *не можетъ*. Форма кристалла считалась необходимой принадлежностью кристаллическаго вещества. Считали, что кристаллъ можно сломать, обломать, раздробить на мелкіе куски, но что ему нельзя придать остающихся измѣненій формы, какъ мы это дѣлаемъ съ пластической глиной.

Мы видимъ теперь, что этотъ взглядъ невѣренъ, а также объясняется и самый механизмъ полученія *пластическихъ измѣненій въ кристаллахъ* <sup>1)</sup>.

Вслѣдствіе такихъ явленій твердыя каменные породы часто оказываются пластическими, какъ бы текучими, чему мы видимъ многочисленныя примѣры въ складкахъ земной коры.

Остановимся нѣсколько на опытахъ надъ *текучестью мрамора*, произведенныхъ въ 1900 году Адамсомъ

<sup>1)</sup> Напомнимъ здѣсь извѣстные опыты Ф. Кика, который помѣщалъ отдѣльные кристаллы въ металлическую трубку, заполняя промежутки между стѣнками трубки и кристалломъ какимъ нибудь веществомъ (для этой цѣли годятся—стеаринъ, парафинъ, сѣра, легкоплавкіе сплавы) и затѣмъ подвергалъ трубку значительному осевому давленію подъ молотомъ, или прессомъ. Кристаллы получали пластическую деформацию; на примѣръ, кристалъ каменной соли получалъ форму бочки и т. д. Подобныя-же опыты производилъ съ минералами и профессоръ Левинсонъ-Лессингъ. См. Извѣстія С.-Петербургскаго Политехническаго Института, 1905 г. III. Т., стр. 115. У него тоже получались пластическія деформации; на примѣръ, кристаллъ каменной соли *обтекалъ* съ двухъ сторонъ встрѣтившееся ему препятствіе такъ же, какъ обтекаетъ свинецъ, подверженный давленію, и т. д.



и Никольсономъ<sup>1)</sup>. Цилиндръ каррарскаго мрамора они помѣщали въ желѣзную трубку, плотно его охватывающую (она была насажена въ нагрѣтомъ состояніи) и затѣмъ подвергали значительному осевому давленію до 13000 атмосферъ, продолжавшемуся иногда короткое время (10 минутъ), иногда-же дѣйствіе нагрузки было продолжительное (до 64 дней). Въ результатъ получалась значительная деформація; цилиндръ получалъ замѣтное распучиваніе по срединѣ (въ родѣ бочки). Разрѣзавши желѣзную трубку, изслѣдовали мраморный цилиндръ снаружи, опредѣлили его сопротивленіе раздробленію, и приготовили изъ него нѣсколько шлифовъ для изученія внутренняго строенія.

Это изслѣдованіе интересно для насъ потому, что здѣсь мы имѣемъ дѣло съ такимъ строительнымъ матеріаломъ, котораго составъ и кристаллическая форма одинаковы съ исландскимъ шпатомъ.

Мраморъ представляетъ собою кальцитъ, т. е. безводную углекислую известь, кристаллизованную въ гексагональной системѣ.

Кристаллическое вещество въ немъ образуетъ соприкасающіяся зерна, почти безъ всякаго связывающаго цемента между ними. Въ этомъ отношеніи строеніе его очень похоже на строеніе чистыхъ металловъ.

Изученіе результатовъ опыта показало, что мраморъ (а также известнякъ, съ которымъ дѣлали такіе-же опыты) получаетъ остающуюся деформацію; она происходитъ частью отъ излома и измельченія зеренъ (катакластическая структура), частью-же отъ явленій сдвига и образованія въ отдѣльныхъ зернахъ мрамора двойниковъ совершенно такихъ, какъ найденные Юингомъ для металловъ. Подобная-же структура встрѣчается и въ природныхъ известнякахъ и мраморахъ, взятыхъ въ тѣхъ мѣстахъ каменноломень, гдѣ имѣются значительныя деформаціи наслоенія.

Если во время опыта поддерживать температуру

---

1) См. The Flow of marble, by F. Adams and I. Nicolson. Engineering. July 27, 1900. Одинъ изъ этихъ экспериментаторовъ геологъ, другой—инженеръ.

около  $400^{\circ}$  С, то никакихъ катакластическихъ явленій (излома и измельченія зеренъ) не замѣчается, и все ограничивается явленіями сдвига и двойниковаго образованія; при этомъ сопротивленіе раздробленію образца, послѣ того, какъ онъ подвергался давленію, остается такое-же, какое онъ имѣлъ до приложенія давленія. Если же опытъ производился при обыкновенной температурѣ, т. е. если получились катакластическія явленія, то сопротивление раздробленію падало очень значительно (уменьшалось въ 2 — 3 и даже 4 раза). Согласно съ этимъ результаты получилъ М. Карманъ <sup>1)</sup>; онъ, изслѣдуя шлифы мрамора, подвергавшагося въ лабораторіи усиленному давленію, нашелъ въ нихъ значительное количество *вновь образовавшихся* полисинтетическихъ двойниковъ. *Скольженіе въ металахъ*, о которомъ мы говорили, появляется сначала въ наиболѣе слабыхъ мѣстахъ, и поэтому должно способствовать *укрѣпленію* металла, если это скольженіе не велико и если послѣ приложенія силы, послѣ полученія деформаций, мы дадимъ металлу нѣкоторый отдыхъ, время, для того чтобы передвинутыя частицы могли установиться въ новыхъ положеніяхъ равновѣсія, или, другими словами, чтобы частицы могли перестроиться въ прочную связанную группу. Такое укрѣпленіе матеріала, желѣза, стали <sup>2)</sup> при помощи остающихся деформаций представляетъ давно извѣстное явленіе, къ которому еще со временъ Навье примѣняется терминъ *écrouissage*. Рядъ слѣдующихъ одна за другой остающихся деформаций постепенно уничтожаетъ слабыя мѣста металла одно за другимъ, по порядку, начиная съ наиболѣе слабыхъ, и переходя къ нѣсколько болѣе прочнымъ. Въ результатѣ можетъ получиться значительное увеличеніе прочности, если все время напряженіе дѣйствовало въ одну и ту-же сторону и *не* замѣнялось по временамъ напряженіемъ противоположнымъ (напримѣръ, растяженіе — сжатіемъ

---

<sup>1)</sup> Festigkeitsversuche unter allseitigem Druck, въ Z. d. V. D. I. 1911 г. Bd. 55. S 1749.

<sup>2)</sup> Оставляю въ сторонѣ вопросъ о томъ, для *всѣхъ ли матеріаловъ* происходитъ такое укрѣпленіе отъ пластической деформации.

или обратно). Все это давно извѣстные факты. Связь ихъ со скольженіемъ хорошо выяснилась при упомянутыхъ выше опытахъ Фауста и Таманна. Они опредѣляли, какъ выше указано, начало скольженія, названное ими низшимъ предѣломъ упругости и затѣмъ продолжали сжатіе до полученія замѣтной остающейся деформации. Послѣ того, прекративъ нагрузку, вновь полировали поверхность, потускнѣвшую вслѣдствіе полученія деформации и повторяли опытъ постепенно увеличивая нагрузку до появления вновь потускнѣнія зеркальной поверхности. При этомъ второмъ опытѣ предѣлъ упругости оказывался значительно большимъ, чѣмъ при начальномъ опытѣ; слѣдовательно произошло замѣтное укрѣпленіе металла. Такое укрѣпленіе можно было повторять нѣсколько разъ сряду. Но наконецъ достигали предѣла, послѣ котораго такое укрѣпленіе отъ деформации прекращалось. Этотъ предѣлъ Фаустъ и Таманнъ называютъ *высшимъ* предѣломъ упругости; онъ значительно больше *низшаго* предѣла упругости, а именно, отношеніе между ихъ величинами оказалось:

для олова . . . . .	1,64
» желѣза . . . . .	2,64
» свинца . . . . .	4,08
» цинка . . . . .	6,85
» никкеля . . . . .	7,78
» красной мѣди . . . . .	13,7

Получившіяся отъ деформации полоски сдвига могутъ быть уничтожены посредствомъ *отжига*, при опредѣленной температурѣ, въ теченіе нѣкотораго времени. Такъ, Фаустъ и Таманнъ нашли, что для красной мѣди нуженъ отжигъ при  $1000^{\circ}\text{C}$ , въ теченіе около двухъ часовъ. При этомъ металлъ перекристаллизовывается, (т. е. частицы его перестраиваются), полоски сдвига исчезаютъ, и восстанавливается прежнее строеніе, такъ что новое испытаніе даетъ тотъ-же *низшій* предѣлъ упругости, какъ и первоначальный. Температуры меньшія  $1000^{\circ}\text{C}$  дѣйствуютъ менѣе энергично; замѣтная перекристаллизация начинается только при  $700^{\circ}$ , а при  $600^{\circ}$  перекристаллизации не происходитъ.

Эти опыты показываютъ, что *полоски сдвига* не представляютъ *трещинъ* полного разъединенія металла, которое не могло бы быть уничтожено нагрѣваніемъ до 1000°. Полоски сдвига — это нѣчто совершенно своеобразное, опредѣляемое кристаллическимъ строеніемъ вещества.

### Испытанія на выносливость.

Какъ извѣстно, эти испытанія заключаются въ томъ, что противоположныя дѣйствія силъ (растяженіе, чередующееся со сжатіемъ, попеременныи изгибъ или крученіе въ ту и другую сторону) прилагаются послѣдовательно къ металлу большое число разъ, пока не получится разрушеніе, или пока не будетъ ясно, что брусокъ можетъ выдержать безпредѣльное число разъ такія приложенія силы. Этимъ путемъ стремятся разъяснить явленіе усталости.

Такіе опыты дали результаты очень цѣнные въ одномъ отношеніи, а именно, указали численныя величины тѣхъ напряженій, которыя могутъ быть допущены безъ опасенія усталости, т. е. могутъ сколько угодно разъ прилагаться къ металлу, безъ опасенія его порчи или разрушенія. Но сущность самаго явленія усталости не была разъяснена этими опытами, пока Юингъ не примѣнилъ къ этому дѣлу микроскопическое изученіе структуры металла.

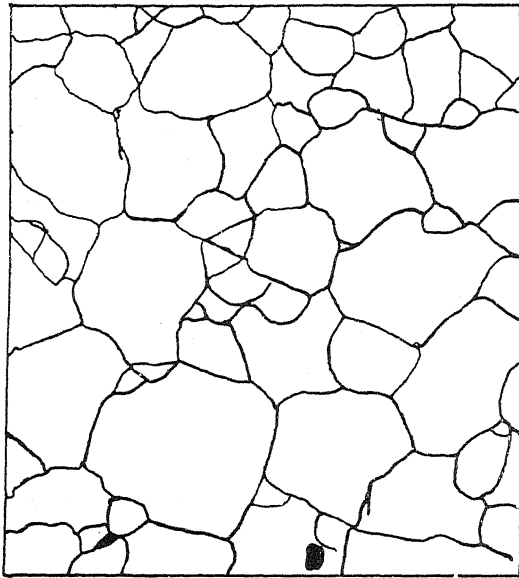
Дѣлая послѣдовательно рядъ наблюденій надъ этой структурой во время обыкновеннаго испытанія на выносливость, Юингъ получилъ слѣдующіе важные результаты <sup>1)</sup>.

Прежде всего появляются извѣстныя намъ *полоски скольженія* (Slip-bands); онѣ становятся замѣтными сна-

---

<sup>1)</sup> См. работу Ewing and Hamphrey въ Phil. Trans. 1903. Vol. 200. Краткое изложеніе полученныхъ результатовъ въ Proc. Roy. Soc. Vol. 71. Кромѣ того по этому вопросу много интереснаго имѣется въ двухъ лекціяхъ Розенгайна о стали, напечатанныхъ въ Proceed. Inst. Mec. Eng. 1911 г. и въ лекціи Юинга, напечатанной въ The Journal of the Institute of Metals. Vol VIII. 1912.

чала только на небольшомъ числѣ зеренъ (кристаллитовъ), затѣмъ постепенно и на другихъ зернахъ. Далѣе число полосокъ увеличивается, онѣ дѣлаются болѣе рѣзкими, яснѣе выраженными, постепенно расширяются. Потомъ края ихъ становятся неровными, повидимому вслѣдствіе перетиранія одной поверхности о другую по той плоскости, на которой произошелъ сдвигъ. Если опытъ продолжать, то нѣкоторыя изъ полосокъ скольженія превращаются въ трещины. Такой характеръ ихъ можно выяснитъ, остановивъ приложеніе усилій, и вновь шлифуя ту поверхность металла, которая наблюдается



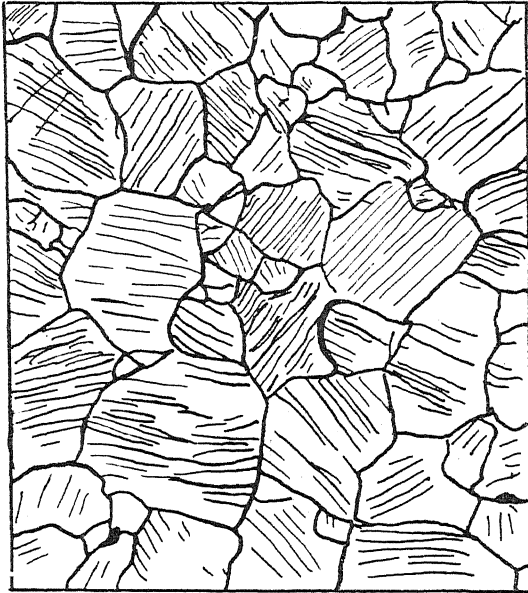
Фиг. 20.

подъ микроскопомъ. Тогда тѣ полоски сдвига, которыя еще не превратились въ трещины, исчезаютъ, а образовавшіяся уже трещины остаются, не уничтожаются новой полировкой.

Если затѣмъ продолжать прикладываніе попеременнхъ усилій, то образовавшіяся трещины распространяются, переходятъ съ одного зерна на другое и наконецъ происходитъ разрушеніе. Такъ, напримѣръ, происходило съ полоской шведскаго (т. е. очень чистаго)

желѣза, при напряженіи въ 9 тоннъ на квадратный дюймъ. Хотя эта нагрузка значительно меньше сопротивленія разрыву (23,6 тонны на квадратный дюймъ) и даже меньше предѣла упругости (13 тоннъ на квадратный дюймъ), но всетаки послѣ нѣсколькихъ милліоновъ растяженій брусокъ сломался.

Это описаніе мы иллюстрируемъ слѣдующими рисунками. На фигурѣ 20 представленъ шлифъ желѣза, про-



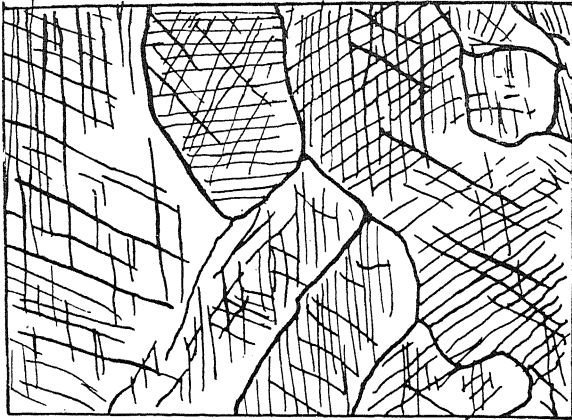
Фиг. 21.

травленный до приложенія къ нему ряда попеременныхъ усилій (увеличеніе около 150 діаметровъ); на немъ видны только границы зеренъ.

Полоски скольженія, получившіяся на *томъ же* образцѣ отъ переменныхъ усилій, изображены на фиг. 21. Слѣдующая фигура 22-я показываетъ случай, когда появляется нѣсколько системъ полосокъ сдвига. Затѣмъ, на фиг. 23 изображено, при сильномъ увеличеніи, одно зерно, на которомъ уже образовалось значительное число трещинъ.

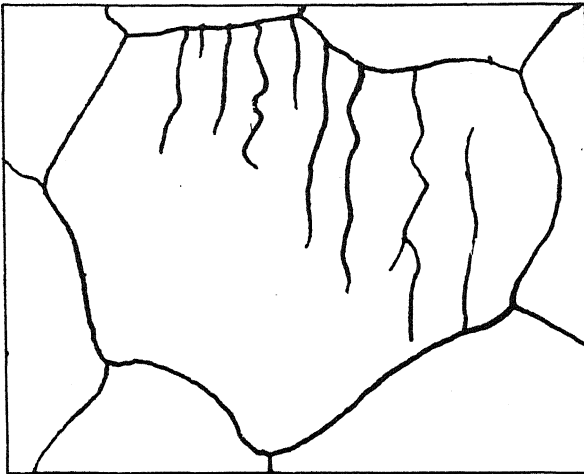
Эти результаты, полученные Юингомъ, были подтверждены другими изслѣдователями, на примѣръ, Роджерсомъ

надъ сталью съ содержаніемъ С отъ 0,27 до 0,58% и другими. Между прочимъ Стэнтонъ и Бэйрстоу дополнили ихъ указаніемъ, что не всегда трещины обра-



Фиг. 22.

зуются на тѣхъ полоскахъ сдвига, которыя появились раньше остальныхъ полосокъ. Бываетъ, что первая полос-



Фиг. 23.

ки не разрастаются, а разрастаніе и образованіе трещинъ получается на нѣкоторыхъ послѣдующихъ полоскахъ.

Иногда образуется до 10—20 системъ полосокъ сдвига, и напередъ нельзя предсказать, которыя изъ

этихъ системъ превратятся въ трещины; это опредѣлится только незадолго до разрушенія. Итакъ, при испытаніи того рода, который мы называемъ пробой на выносливость, разрушеніе есть послѣдствіе *мъстнаго* явленія— *образованія и разрастанія нѣкоторыхъ трещинъ*, получающихся на нѣкоторыхъ изъ многочисленныхъ полосокъ сдвига.

Такое описаніе *явленій усталости* выясняетъ много сторонъ этого явленія, прежде казавшихся непонятными и странными. Сюда относится слѣдующее:

а) Прежде удивлялись тому, что при испытаніи на выносливость, а такъ же и при разрушеніи отъ усталости дѣйствующихъ частей машинъ (напримѣръ, осей вагоновъ и паровозовъ) вовсе не проявляется пластичность матеріала, т. е. при разрушеніи не получается замѣтной, крупной, видной на глазъ деформации, хотя бы мы имѣли дѣло съ очень пластичнымъ матеріаломъ, напримѣръ, литымъ желѣзомъ, которое при статической пробѣ на разрывъ даетъ удлиненіе, составляющее 20—30% первоначальной длины.

Для самыхъ мягкихъ сортовъ стали и желѣза характеръ излома получается такой же, какъ для жесткой стали; напримѣръ, ось рѣзко ломается пополамъ, раздѣляясь на двѣ части по плоскости поперечнаго сѣченія, и не получается сильнаго изгиба, или вытягиванія, суживанія у мѣста разрушенія.

Теперь мы понимаемъ, что все это есть слѣдствіе того, что порча происходитъ въ одномъ мѣстѣ, а не по всей массѣ тѣла.

б) По той-же причинѣ разрушеніе происходитъ внезапно, безъ предварительныхъ предупреждающихъ явленій, т. е. безъ крупныхъ пластическихъ деформаций.

с) Такъ какъ порча *мъстная*, сосредоточена въ одномъ мѣстѣ, то остальной металлъ сохраняетъ свои прежнія качества, оказывается имѣющимъ высокое сопротивленіе и достаточную пластичность. Такой результатъ очень часто находили при изслѣдованіи сломавшихся частей машинъ и подвижнаго состава желѣзныхъ дорогъ. Онъ прежде очень удивлялъ изслѣдователей, которые затруднялись объяснить себѣ, какимъ



образомъ можетъ произойти рѣзкій внезапный изломъ, если металлъ прочный и пластичный, и это выяснилось опытами Юинга.

Мы теперь знаемъ, что высокая степень пластичности не обезпечиваетъ хорошей выносливости; и неоднократно указывали, что въ отношеніи выносливости или вовсе теряется различіе между мягкими (пластичными) и жесткими (мало пластичными) сортами стали, или даже, прямо противно ожиданіямъ, жесткіе сорта оказываются болѣе выносливыми, чѣмъ мягкіе. Розенгайнъ даже говоритъ, что если заботиться *только о выносливости*, о хорошемъ сопротивленіи большому числу перемѣнъ напряженія въ ту и другую сторону, не обращая вниманія на прочія важныя для практики свойства, то среди всѣхъ сортовъ желѣза и стали наилучшей должна оказаться сталь, которая вся состоитъ изъ перлита, что будетъ при содержаніи углерода около 0,9<sup>0</sup>/<sub>0</sub>, а это—достаточно жесткій металлъ.

d) При изслѣдованіи внезапно сломавшихся частей, неоднократно производили микроскопическое изученіе строенія металла около самаго мѣста излома, для чего на поверхности излома отшлифовывали небольшую площадку, полировали ее и ставили подъ микроскопъ. Но, конечно, трещины, которыя вызвали изломъ, не попадутъ въ этотъ шлифъ и не будутъ открыты, ихъ никогда и не находили при подобныхъ испытаніяхъ. Также обыкновенно не находятъ никакого измѣненія въ микроскопическомъ строеніи металла, никакого перерожденія его, вдали отъ мѣста излома.

e) Давно замѣчено, что для выносливости металла очень вредны рѣзкіе переходы въ формѣ испытываемаго предмета, быстрыя измѣненія величины поперечнаго сѣченія, винтовая нарѣзки и т. п. Въ этихъ мѣстахъ, какъ показываетъ теорія упругости, должны получиться очень большія внутреннія напряженія, слѣдовательно здѣсь должны раньше всего получиться замѣтныя полоски сдвига, которыя потомъ, разрастаясь, поведутъ къ разрушенію.

f) Экспериментаторы, производившіе изслѣдованіе на выносливость, неоднократно указывали, что для пра-

вильности результатовъ необходимо очень тщательно изготовлять пробный брусокъ и хорошо полировать его, иначе онъ окажется слабымъ. Даже *небольшія* царапины, остающіяся отъ обработки наждачнымъ камнемъ, сильно уменьшаютъ выносливость бруска, такое же дѣйствіе оказываютъ и тонкія черточки, которыя ставятъ на пробныхъ брускахъ для отмѣтки на нихъ опредѣленной длины. Это явленіе объясняется такъ же, какъ и для пункта е.

г) Теперь становится понятнымъ наблюденіе, сдѣланное Коммерсомъ<sup>1)</sup> при испытаніи на выносливость на приборъ Ландграфъ-Турнера (поперемѣнные изгибы, въ ту и другую сторону). Коммерсъ указываетъ, что звукъ, который получается при этомъ, замѣтно измѣняется *незадолго до разрушенія*. Это происходитъ оттого, что уже получились трещины, которыя для звука имѣютъ такое-же значеніе, какъ измѣненіе длины звучащаго тѣла.

h) Тотъ же наблюдатель указываетъ, что незадолго до разрушенія испытываемаго бруска, онъ такъ ослабѣваетъ, что его можно сломать руками, сдѣлавши нѣсколько перегибовъ; это указываетъ, что уже образовались и развились трещины. И въ самомъ дѣлѣ, снявши брусокъ незадолго до его разрушенія, замѣчали въ немъ трещины у мѣста закрѣпленія (фиг. 24).

i) Приведемъ еще слѣдующій фактъ, замѣченный Уртон'омъ и Льюис'омъ при испытаніи на выносливость. У нихъ полоски металла перегибались въ ту и другую сторону, при чемъ величина перегиба, *перемѣщеніе*, оставалась постоянной, а на приборъ измѣрялась и автографически записывалась величина *напряженія*, т. е. момента изгиба. Форма діаграммы получилась слѣдующая (фиг. 25). Мы видимъ, что долгое время моментъ изгиба остается постояннымъ; металлъ не ослабѣваетъ. Только подъ конецъ опыта моментъ, а слѣдовательно и сопротивленіе изгибу, постепенно падаетъ; это періодъ образования и развитія трещинъ.

к) Мартенсъ и другіе наблюдатели указывали, что

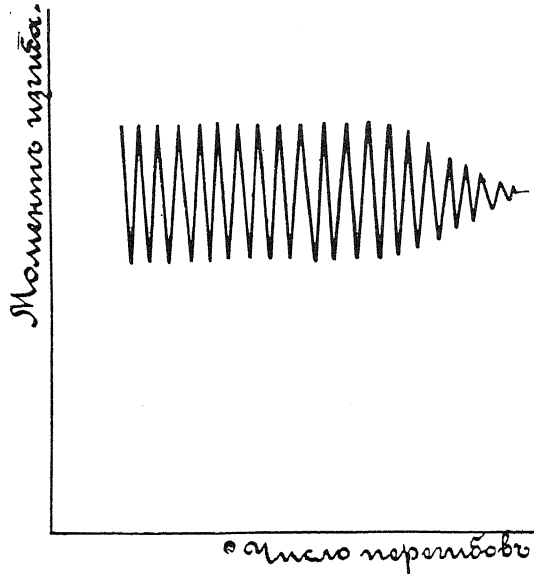
---

<sup>1)</sup> Revue de Métallurgie 1913. № 1. Отчетъ о Конгрессѣ въ Нью-Йоркѣ.

видъ поверхности разрушенія при повторныхъ напряженіяхъ сильно отличается отъ вида, получающагося при разрушеніи сразу, однимъ приложеніемъ силы. Различіе это настолько характерно, говоритъ онъ, что по виду поверхности разрушенія можно отгадать былъ ли брусокъ разрушенъ сразу или большимъ числомъ повторныхъ напряженій.



Фиг. 24



Фиг. 25.

Это вполне понятно, такъ какъ при разрушеніи статической нагрузкой происходятъ совсѣмъ другія явленія и внутреннія деформации, чѣмъ описанныя Юингомъ для случая повторныхъ напряженій.

1) Какъ извѣстно, опыты надъ выносливостью металловъ неоднократно, (хотя не всегда, и не для всѣхъ матеріаловъ) подтверждали справедливость теоріи Баушингера о такъ называемомъ *естественномъ* предѣлѣ упругости <sup>1)</sup>; по Баушингеру этотъ предѣлъ опредѣляетъ ту величину *измѣняемости напряженій* (range of stress), которая вполне безопасна, металлъ выдерживаетъ произвольное число перемѣнъ напряженій безъ порчи, если

См. выше цитированныя работы Turner'a и Bairstow'a.

*измѣняемость*, (т. е. разность между наибольшимъ и наименьшимъ напряжениями) не превосходитъ естественнаго предѣла упругости. (Самый этотъ предѣлъ представляетъ нѣчто близкое къ низшему предѣлу упругости по опредѣленію Таманна и Фауста. Чтобы получить естественный предѣлъ упругости, нужно передъ опытомъ отжечь металлъ). Все это позволяетъ сдѣлать заключеніе о тѣсной связи *безопасной величины измѣняемости силы* съ явлениями скользящаго кристаллическаго вещества.

### Отжиганіе для возстановленія свойствъ уставшаго металла.

Мы видѣли, что первоначально образовавшіяся полосы сдвига, могутъ быть уничтожены надлежащимъ отжиганіемъ, при чемъ возстановляются прежнія свойства металла. Отсюда можно заключить, что періодическое отжиганіе полезно для увеличенія выносливости, для увеличенія срока службы металлическаго предмета, для увеличенія того числа перемѣнъ силы, которое онъ можетъ выдержать до разрушенія. Въ практикѣ неоднократно съ успѣхомъ прибѣгали къ отжиганію для увеличенія выносливости желѣзныхъ и стальныхъ частей машинъ, для поправки тѣхъ изъ нихъ, которыя уже устали, для возстановленія ихъ силъ и здоровья. Это въ родѣ климатическаго леченія для усталыхъ людей, которыхъ въ случаѣ неврастенія посылаютъ въ теплыя края. Но прописывать такое леченіе уставшимъ металламъ нужно съ большою осторожностью и осмотрительностью. Во первыхъ, нужно назначать такое леченіе во время, пока болѣзнь еще не развилась очень сильно, т. е. когда появились полосы сдвига, можетъ быть многочисленныя, но еще нѣтъ *трещинъ*. При развитіи послѣднихъ трудно ожидать большой пользы отъ отжиганія, и дѣйствительно Роджерсъ <sup>1)</sup> нашелъ, что если сталь устала больше извѣстнаго предѣла, то отжиганіе не возстановляетъ ея прежняго сопротивленія. Это въ родѣ того что въ медицинѣ знаютъ относительно усталости нервовъ, когда она перешла извѣстныя границы.

1) См. Journal of the Iron Institute № 1 1905 г.

Тотъ же Роджерсъ замѣтилъ, что если, послѣ большаго числа переменъ напряженія, отжечь брусокъ и затѣмъ продолжать приложеніе попеременныхъ силъ до разрушенія, то на поверхности излома видны кое гдѣ пятнами, *побѣжалые цѣпты*, указывающіе, что здѣсь при отжиганіи были уже трещины, покрывшіяся при накаливаніи тонкимъ слоемъ окисла. Во вторыхъ, температура отжига и продолжительность его должны быть взяты опредѣленныя, отвѣчающія свойствамъ поправляемаго металла.

Слишкомъ высокая температура, и слишкомъ продолжительный отжигъ могутъ, вмѣсто исправленія, совершенно испортить металлъ, вполне измѣнить его строеніе, сдѣлать его крупнозернистымъ. Въ этомъ состоитъ пережогъ желѣза <sup>1)</sup>. Для желѣза и стали правильный отжигъ долженъ производиться при температурѣ немного выше такъ называемой точки  $Ag_3$  Осмонда; нужно подержать металлъ нѣкоторое время при этой температурѣ, затѣмъ быстро охладить до температуры точки  $Ag_1$ ; послѣ того должно слѣдовать медленное охлажденіе. Самая температура точки  $Ag_3$  измѣняется съ измѣненіемъ содержанія углерода. Если углерода очень мало, то точкѣ  $Ag_3$  отвѣчаетъ температура около  $900^{\circ}C$ .

Затѣмъ не нужно возлагать на отжигъ *неумѣренныя* надежды. Иногда онъ даетъ хорошіе результаты. Джонъ Андерсонъ, который долго былъ механикомъ Вуличскаго Арсенала, и потому имѣлъ много дѣла съ цѣпями подъемныхъ машинъ, говоритъ въ своемъ старинномъ курсѣ сопротивленія матеріаловъ, что цѣпи нужно отжигать періодически, и что такимъ путемъ можно значительно продлить срокъ ихъ службы. Напримѣръ, отжигаютъ цѣпи черезъ  $1\frac{1}{2}$ —2 года службы. Но сколько

---

<sup>1)</sup> Нагрѣваніе до  $1000^{\circ}C$  портитъ желѣзо, дѣлаетъ его хрупкимъ. Чѣмъ дольше держать желѣзо при такой температурѣ, тѣмъ хрупче оно дѣлается; наконецъ, получается матеріалъ, который ломается отъ паденія на полъ съ небольшой высоты, отъ котораго можно молоткомъ отбивать куски. См. Heyn, Krankheitserscheinungen in Eisen und Kupfer, въ Zeit d. Ver. Deut. Ing. 1902 S. 1115. Указанія Heyn'a относятся къ желѣзу, почти вовсе не содержащему углерода и другихъ примѣсей.

разъ и какъ часто можно повторять такое отжиганіе? Мнѣ пришлось встрѣтить въ технической литературѣ совѣтъ отжигать цѣпи подъемныхъ машинъ *каждый мѣсяцъ*. Не говоря уже о томъ, какія хлопоты и помѣхи ходу заводскаго дѣла получаютъ отъ такого частаго отжиганія, нужно еще изслѣдовать, какія переменныя строенія произойдутъ въ желѣзѣ, которое будетъ отожжено, на примѣръ, въ теченіе 2-хъ лѣтъ двадцать четыре раза. Безъ предварительнаго опыта нельзя въ точности предсказать результаты; я опасаюсь, что они будутъ неблагоприятны для прочности. При лабораторныхъ испытаніяхъ иногда отжигали желѣзо или сталь до 12 разъ сряду, послѣдовательно, одинъ отжигъ за другимъ (на примѣръ опыты Викстида, Адамсона). При этомъ пластичность металла очень увеличивалась и удлиненіе его при разрывѣ составляло до 80% первоначальной длины, т. е. въ этомъ отношеніи онъ сдѣлался какъ воскъ: слѣдовательно произошло радикальное измѣненіе свойствъ металла, и безъ дальнѣйшихъ испытаній и пробъ ничего нельзя сказать о пригодности его для цѣпей и т. п.

Тѣ явленія усталости, о которыхъ сказано выше происходятъ въ чистомъ видѣ на однородныхъ матеріалахъ, не содержащихъ почти вовсе примѣсей, вредно вліяющихъ на прочность. (Юингъ и Гёмфри дѣлали свои опыты съ очень чистымъ шведскимъ желѣзомъ). Структура такихъ матеріаловъ представляется непосредственно прикасающимися между собою многогранниками (кристаллитами, зернами, клѣтками); прикосновеніе этихъ зеренъ непосредственное, *почти* безъ всякой прослойки посторонняго вещества, безъ междуклѣточного вещества. При такихъ условіяхъ связь между отдѣльными зернами (клѣтками) оказывается, какъ показываетъ опытъ, очень прочная, и порча, разрушеніе начинается *внутри* зерна; въ одномъ изъ кристаллитовъ получаютъ первыя полоски сдвига, потомъ распространяющіяся. Разрушеніе, трещины, происходятъ *внутри* зерна, а не состоятъ въ отрываніи одного зерна отъ другого; связь зеренъ между собою не нарушается. Это тотъ видъ разрушенія, который Осмондъ характеризуетъ названіемъ *внутри клѣточного* (intracellulaire), въ отличіе отъ разрыва, состоя-

щого въ раздѣленіи зеренъ однихъ отъ другихъ; къ послѣдному случаю относится терминъ Осмонда *intercellulaire*. Итакъ, теперь можно считать установленнымъ, что въ *чистыхъ* металлахъ связь между отдѣльными зернами сильнѣе, чѣмъ связь внутри зерна, что границы между зернами представляютъ не мѣста *слабости*, какъ думали до опытовъ Юинга, а наоборотъ эти границы представляютъ наиболѣе прочныя мѣста въ металлѣ Юингъ первый указалъ на это <sup>1)</sup>).

При существованіи примѣсей структура измѣняется и получается другой результатъ. Примѣси (въ формѣ сѣрнистыхъ соединеній, или нѣкоторыхъ сплавовъ, или эвтектики, состоящей изъ FeS и Fe или же FeO и Fe, и т. д.) вытѣсняются изъ внутри зерна наружу, располагаются по оболочкѣ зерна, образуютъ между клѣточную прослойку, или оболочку зеренъ; такъ какъ эти прослойки обыкновенно слабѣе металла, заключающагося въ зернахъ, то разрушеніе, начинается съ нихъ, трещины образуются въ этихъ прослойкахъ, отдѣляютъ одно зерно отъ другого. Схематически можно изобразить такую структуру фигурой 26, гдѣ прослойки не заштрихованы.

Иногда такое строеніе появляется весьма рѣзко и опредѣленно: отдѣльныя зерна видны на глазъ и могутъ быть отдѣлены. Напомню здѣсь нѣсколько примѣровъ:

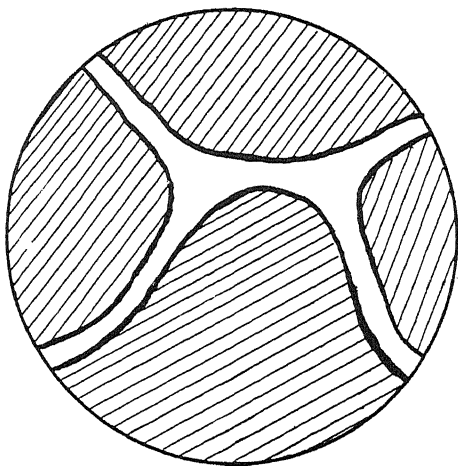
а) Вспомнимъ давнишнее наблюденіе Бессемера, которое отъ разсказалъ на одномъ изъ митинговъ Желѣзнаго Института <sup>2)</sup>). Была сдѣлана пробная отливка изъ мягкой стали, почти вовсе не содержащей углерода, но зак-

---

<sup>1)</sup> Такой результатъ можетъ показаться страннымъ. Скорѣе можно было бы ожидать обратнаго—значительной прочности *внутри* зерна и нѣкоторой слабости на контурѣ его. Что-бы объяснить указываемое опытомъ увеличеніе прочности на контурѣ зерна, дѣлаютъ слѣдующую гипотезу, полагаютъ, что на границѣ прикосновенія зеренъ имѣется тонкій слой связующаго *цемента*, который состоитъ изъ того-же металла, но находящагося не въ кристаллическомъ состояніи, а въ *аморфномъ* видоизмѣненіи, какъ мы уже говорили выше, къ этой гипотезѣ присоединились выдающіеся металлурги—Юингъ, Розенгайнъ, Осмондъ и др. См. статью Rosenhain and Donald Ewen. Intercrystalline Cohesion in Metals въ журналѣ Intern. Zeit. für Metallographic. Feb 1913 г.

<sup>2)</sup> См. Engineering V. 41 p. 491.

лучавшей отъ  $1\frac{1}{2}\%$  до  $3\frac{3}{4}\%$  фосфора. Форма была зарыта въ яму, вырытую въ песокъ, отдѣлена отъ него слоемъ угля, и хорошо прикрыта сверху; вообще были приняты мѣры, чтобы получить очень медленное охлажденіе отливки и этимъ вызвать образованіе крупныхъ кристалловъ; и, дѣйствительно, по прошествіи десятидневного охлажденія, строеніе оказалось крупно кристаллическимъ. Металлъ былъ настолько хрупокъ, что отъ удара по болванкѣ 2-хъ фунтовымъ молоткомъ посыпался дождь кристалловъ (т. е. зеренъ), и по всей массѣ почти не было никакой



Фиг. 26.

связи между отдѣльными кристаллитами. Но самые кристаллиты оказались совершенно ковкими и легко плющились на наковальнѣ, т. е. представляли хорошее ковкое желѣзо. Мы можемъ объяснить это любопытное явленіе тѣмъ, что на поверхности зеренъ желѣза образовалась во время медленнаго охлажденія тонкая пленка фосфористаго желѣза, или тонкій слой твердаго раствора его, что почти уничтожило связь между зернами желѣза. Здѣсь мы имѣемъ ключъ къ объясненію вліянія фосфора—главнаго врага хорошей стали.

б) Очень характерный фактъ былъ указанъ Гоуландомъ во время преній по второму докладу извѣстной



английской Комиссии о Сплавах<sup>1)</sup>. Фактъ этотъ относится къ дѣйствию висмута на серебро; небольшое количество висмута сдѣлало серебро очень хрупкимъ, такъ что слитокъ вѣсившій 1000 унцій, легко можно было разбить ударомъ молотка. Изломъ получился крупнокристаллической и легко было выдѣлать нѣсколько отдѣльныхъ кристалловъ; они оказались вполне мягкими и ковкими. Очевидно здѣсь была ликвиация висмута (или его соединенія съ серебромъ), который тонкимъ слоемъ обволакивалъ зерна серебра и такимъ образомъ сдѣлалъ слитокъ хрупкимъ; а отдѣльныя зерна серебра остались ковкими.

с) Профессоръ Арнольдъ сообщилъ подобныя же данныя для золота, содержащаго въ себѣ примѣсь висмута<sup>2)</sup>. Количество этой примѣси около 0,1 процента дѣлаетъ золото абсолютно хрупкимъ. На микрограммахъ видно, что сплавъ золота въ висмутѣ (эвтектика) образовалъ оболочку кругомъ зеренъ чистаго золота. При небольшомъ нагрѣваніи эта оболочка размягчалась, такъ что можно было выдѣлать кристаллы золота, которые оказались мягкими; ихъ можно было расплющить въ листокъ.

Подобные случаи усиленнаго развитія междуклѣточной оболочки представляютъ рѣдкость; для полученія ихъ нужно принимать особыя мѣры. Но въ практикѣ безпрестанно случается образованіе очень тонкой междуклѣточной оболочки между микроскопическими зернами. Такъ какъ вещество оболочки значительно слабѣе и хрупче, чѣмъ остальной металлъ, то при усталости металла трещины появятся раньше всего въ этой оболочкѣ.

Таковы тѣ микроскопическія трещины (microflaws), на которыя постоянно указываетъ Т. Андрусъ въ своихъ многочисленныхъ статьяхъ<sup>3)</sup>. Онъ ихъ находилъ во мно-

---

1) Alloys Research Committee. Она учреждена при Обществѣ Инженеръ-Механиковъ, въ 1890 году и продолжаетъ работать и теперь. Въ 1912 году былъ представленъ *десятый* докладъ ея, и каждый изъ докладовъ представляетъ замѣчательный вкладъ въ науку.

2) Сообщено во время преній по поводу десятаго доклада Комиссии о Сплавахъ. См. Proc. Inst. Mec. Eng. 1912.

3) См. T. Andrews. Engineering. Vol. 63, 64, 65.

гих случаяхъ въ рельсахъ, гребныхъ валахъ, паровозныхъ осяхъ и т. п. предметахъ, неожиданно разрушившихся во время службы.

Иногда ихъ оказывалось такъ много, что на одномъ квадратномъ дюймѣ можно былъ сосчитать до сотни трещинъ. Андрусъ приписываетъ эти трещины присутствію сѣры въ желѣзѣ.

Изъ новыхъ наблюдений остановлюсь на докладѣ профессора Менаже, представленномъ въ Нью-Йоркѣ Конгрессу по испытанію матеріаловъ <sup>1)</sup>. Менаже указываетъ, что часто на головкахъ рельсовъ, прослужившихъ извѣстное время, оказываются трещины, которыя и служатъ указателями усталости. Глубина ихъ доходить до 4 и даже 8 миллиметровъ. Иногда ихъ нельзя сразу замѣтить, такъ какъ онѣ закрываются, заполняются металломъ рельса, текущимъ подъ давленіемъ колесъ подвижного состава. Для проявленія ихъ нужно снять небольшой верхній слой металла около 0,1 миллиметра толщиною; онъ удаляется пилой, наждачнымъ колесомъ или наждачной бумагой. Если затѣмъ протравить поверхность въ теченіе нѣсколькихъ минутъ слабой соляной кислотой, то становятся видны даже тонкія трещины. Ихъ можно сфотографировать. Такія трещины очень ослабляютъ рельсъ, и при пробѣ на изломъ сопротивленіе оказывается значительно меньше (иногда вдвое), въ случаѣ если эти трещины прихоятся на растянутой сторонѣ, чѣмъ когда онѣ придутся на сжатой сторонѣ рельса.

Въ нѣкоторыхъ каменныхъ породахъ зернистого сложенія связь между зернами очень слаба. При сжатіи такихъ породъ разрушеніе состоитъ въ полномъ отдѣленіи зеренъ, и камень разсыпается, обращаясь въ крупный песокъ или хрящъ. Мнѣ однажды пришлось получить такой результатъ для крупно-зернистаго гранита изъ Кременчуга.

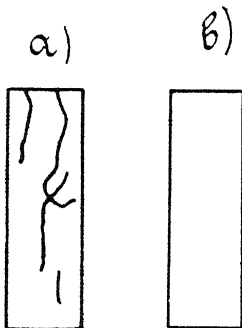
Итакъ, въ металлахъ встрѣчаются двѣ формы разрушенія: а) внутри-клѣточное, т. е. скольженія и трещины внутри зерна, б) между-клѣточное, при которомъ

---

<sup>1)</sup> Revue de Métallurgie 1913. № 1.

одно зерно отдѣляется отъ другого. Появленіе первой или второй формы опредѣляется иногда, какъ мы только что видѣли, тѣмъ обстоятельствомъ: существуютъ или отсутствуютъ между-клѣточные включенія между зернами.

Но кромѣ этого обстоятельства на полученіе той или другой формы значительно вліяетъ еще характеръ напряженія, вызваннаго въ металлѣ нагрузками, а этотъ характеръ опредѣляется распредѣленіемъ внѣшнихъ силъ. Если нагрузка односторонняя, напримѣръ, простое сжатіе, по извѣстному направленію, то она легче произведетъ отдѣленіе одного зерна отъ другого, чѣмъ нагрузка, дѣйствующая съ нѣсколькихъ сторонъ, напримѣръ, когда, кромѣ давленія, по оси бруска есть еще значительное давленіе на его боковую поверхность. Въ послѣднемъ случаѣ разъединеніе зеренъ одного отъ другого затруднено, и нужно ожидать, что получится разрушеніе, состоящее во внутреннихъ сдвигахъ внутри кристаллитовъ, безъ разъединенія зеренъ. Вліяніе бокового давленія очень хорошо изслѣдовано въ недавнее время Карманомъ, производившимъ опыты съ мраморомъ и известнякомъ. Отсылая читателя къ работѣ этого ученаго <sup>1)</sup>, я приведу изъ нея только одинъ примѣръ, ярко показывающій различіе явленій въ зависимости отъ того, присутствуетъ ли боковое давленіе или нѣтъ. На фиг. 27 показаны результаты сжатія призмы известняка; форма



Фиг. 27.

разрушенія (а) относится къ случаю, когда нѣтъ бокового давленія; мы видимъ на поверхности многочисленныя трещины. Между тѣмъ, когда есть значительное боковое давленіе (см. б), то на поверхности призмы никакихъ трещинъ не замѣтно.

#### Случай неоднородности.

Часто приходится имѣть дѣло съ металлами, которые не представляютъ собою однороднаго тѣла, а при разсматриваніи подъ микроскопомъ

<sup>1)</sup> Karman. Festigkeitsversuche въ Z. d. V. d. I. Bd. 55, S. 1749 (1911 г.).

оказываются состоящими изъ двухъ или болѣе компонентовъ, имѣющихъ различныя механическія свойства. Явленія усталости и разрушенія при этомъ усложняются и получается различіе для двухъ случаевъ: а) медленнаго разрушенія; б) разрушенія ударомъ. Разсмотримъ эти явленія для наиболѣе интереснаго для техника случая, а именно, когда имѣемъ дѣло съ мягкой сталью, т. е. металломъ, который чаще всего примѣняется для построекъ и машинъ. Этотъ матеріалъ подъ микроскопомъ показываетъ, главнымъ образомъ, двѣ составныя части структуры: 1) ферритъ, болѣе пластичный, 2) перлитъ, болѣе жесткій. При медленномъ разрывѣ, явленія начинаются съ того, что въ ферритѣ получаютъ полоски скольженія; при этомъ ферритъ увлекаетъ съ собою зерна перлита, а этотъ послѣдній сначала не получаетъ деформации. Затѣмъ перлитъ не выдерживаетъ и начинаетъ давать трещины, которыя распространяются и переходятъ съ одного зерна на другое, прорѣзая какъ перлитъ, такъ и ферритъ. Окончательно поверхность разрыва проходить *какъ черезъ ферритъ, такъ и черезъ перлитъ*.

При разрывѣ ударомъ не получается большой деформации; трещины и поверхность разрушенія проходятъ *только по ферриту*; трещины какъ бы *избѣгаютъ перлита*, который какъ будто тщательно изолированъ отъ разрыва. Трещины и поверхность разрушенія идутъ по плоскостямъ скольженія феррита, представляющимъ слабыя мѣста, и минуютъ почти вполне жесткій перлитъ, хотя онъ гораздо болѣе хрупокъ, чѣмъ ферритъ.

Такое-же избѣганіе трещинами перлита замѣчается и при пробѣ на выносливость, когда дѣйствуютъ попеременные усилія. И въ этомъ случаѣ, какъ въ случаѣ удара, трещины должны тщательно обходить перлитъ; изрѣдка онѣ идутъ по контуру перлитовыхъ зеренъ, а гораздо чаще между контуромъ перлита и трещиной остается полоса феррита, въ которомъ ясно опредѣляются плоскости скальванія <sup>1)</sup>. Таковы результаты, *полученные многими наблюдателями* <sup>2)</sup>.

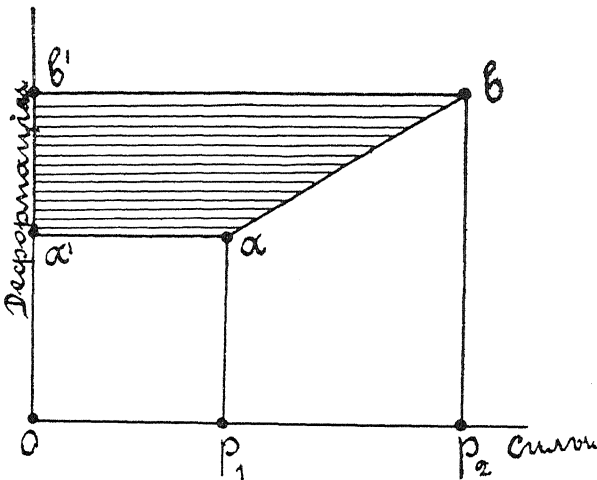
<sup>1)</sup> См. лекціи Rosenhain'a о стали, въ Proc. Inst. Mec. Eng 1911 года.

<sup>2)</sup> Rosenhain, Rogers, Stanton and Bairstow, Seaton and Judd.

### Гистерезись.

Въ машинахъ и приборахъ для изслѣдованія выносливости металловъ, подвергаютъ испытуемый образецъ большому числу приложеній внѣшней силы, на примѣръ, то растягивающей то сжимающей, или изгибающей то въ ту, то въ другую сторону. Внѣшняя сила измѣняется, то увеличивается, то уменьшается, затѣмъ достигаетъ своей первоначальной величины. Такія измѣненія и возвращеніе къ первоначальной величинѣ представляютъ циклъ, круговой процессъ. Этотъ циклъ, круговой процессъ, повторяется много разъ.

Если для одного цикла построить кривую, изображающую зависимость между внѣшними силами и деформациями, то при небольшихъ внѣшнихъ силахъ получаютъ (фиг. 28) одну прямую или кривую линію а в.



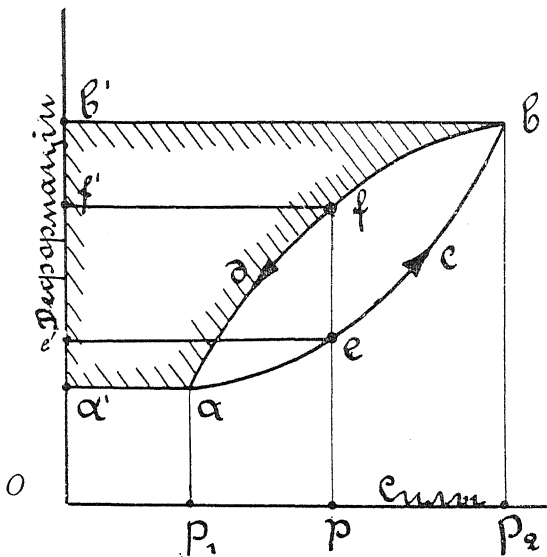
Фиг. 28.

Когда внѣшняя сила увеличивается отъ  $OP_1$  до  $OP_2$ , то измѣненіе деформаций изображается точками, лежащими на прямой отъ а до в; когда же начнется уменьшеніе силы отъ  $OP_2$  до  $OP_1$ , то деформации изображаются точками той же линіи а в, отъ в, до а. Внутреннія упругія силы при увеличеніи внѣшней нагрузки сопротивляются деформированію и даютъ отрицательную работу, измѣряемую площадью  $abb'a'$ . При обратномъ

уменьшении нагрузки и восстановлении формы внутренней силы дают положительную работу, величина которой изменяется той же площадью  $abb'a'$ .

Слѣдовательно, по окончаніи цикла, полная работа внутреннихъ силъ оказывается нулемъ, такъ какъ состоитъ изъ двухъ одинаковыхъ по величинѣ частей, одной положительной, другой отрицательной. Испытываемый образецъ за весь циклъ ничего не приобрѣлъ; ему не сообщено никакой энергіи извнѣ. Весь круговой процессъ, въ этомъ случаѣ *вполнѣ обратимъ*.

Но этотъ случай получается только при небольшихъ нагрузкахъ. При болѣе значительныхъ силахъ, процессъ окажется необратимымъ. Когда сила, (фиг. 29) увели-



Фиг. 29.

чивается отъ  $OP_1$  до  $OP_2$ , то точка, изображающая деформацию, движется по линіи  $a$   $c$   $b$ . При уменьшеніи же нагрузки отъ  $OP_2$  до  $OP_1$ , точка, изображающая деформацию, идетъ *не* по прежней кривой  $b$   $c$   $a$ , а по другой  $b$   $d$   $a$ , т. е. величина деформации отстаётъ, *запаздываетъ*, не успѣваетъ слѣдить за уменьшеніемъ силы. Напримеръ, когда уменьшаясь отъ  $OP_2$ , сила дойдетъ до  $OP$ , то величина деформации отъ  $Ob'$  не дойдетъ до значе-

нія  $Oe'$ , какое она имѣла при той же силѣ  $OP$  въ периодъ увеличенія силы, а окажется  $Og'$ , т. е. отстанетъ, запоздаетъ на величину  $f' e'$ .

Здѣсь имѣемъ необратимое явленіе. Линіи, изображающія деформацію въ зависимости отъ силы, т. е.  $acb$  для увеличенія силы и  $bda$  — для уменьшенія ея не совпадаютъ между собою. Образуется *петля упругаго гистерезиса*, (запаздыванія)  $acbda$ . Величина петли упругаго гистерезиса у металловъ, если они не устали и не получили замѣтнаго остающагося удлиненія, не велика <sup>1)</sup>, Такъ, Юингъ нашель, что для желѣза и стали наибольшая ширина этой петли, т. е. линія  $AB$  (фиг. 30), не превышаетъ одной сотой доли полной деформации  $KM$ . Поэтому, для того, чтобы при указанныхъ условіяхъ измѣрить гистерезисъ, нужно примѣнять очень точные измѣрительные приборы—экстензометръ Юинга, поворачивающіяся зеркала, или комбинацію этихъ двухъ аппаратовъ. Недавно Б. Гопкинсонъ, помощію такой комбинаціи, опредѣлилъ гистерезисъ при растяженіи и сжатіи даже для короткаго бруска, имѣвшаго длину всего четыре дюйма, для котораго линейная величина гистерезиса не превышала  $\frac{1}{50000}$  дюйма <sup>2)</sup>. Прежде это явленіе не замѣчалось, вслѣдствіе недостаточной точности приборовъ. Теперь же опредѣленіе его представляетъ вполнѣ возможную задачу, которая иногда даже ставится какъ одно изъ нормальныхъ упражненій *для студентовъ* <sup>3)</sup>.

Когда металлъ усталъ отъ попеременныхъ усилій, то гистерезисъ можетъ значительно увеличиться.

Величина его также оказывается значительной, если металлъ получилъ значительную остающуюся деформацію,

---

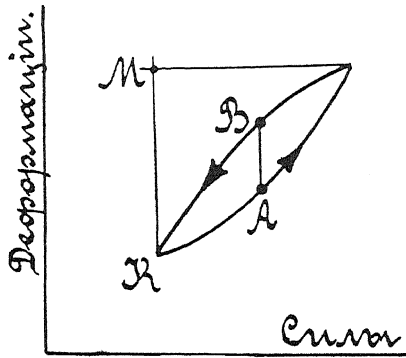
<sup>1)</sup> Она болѣе значительна для резины. Предлагаютъ опредѣлять величину гистерезиса для резины въ качествѣ ея испытанія. Хорошая резина уже послѣ шести цикловъ должна давать постоянную площадь петли. См. Engineering. Редакціонная статья. Feb. 11 1910, p. 183.

<sup>2)</sup> См. Proc. Royal. Soc. A. Vol. 87 p. 502.

<sup>3)</sup> См. Searle. Experimental Elasticity, гдѣ приведены упражненія въ лабораторіи Кембриджскаго Университета. Тамъ, для опредѣленія гистерезиса при растяженіи, берутъ довольно длинную изслѣдуемую проволоку (2,85 метра длиною). Легче опредѣлить гистерезисъ при крученіи, и для этого достаточна проволока длиною въ 40 сант.

и затѣмъ испытаніе дѣлается сейчасъ же, непосредственно послѣ полученія такой деформации, не давши металлу времени отдохнуть, поправиться отъ перенапряженія. Тогда ширина петли гистерезиса АВ (фиг. 30) можетъ дойти до  $\frac{1}{12}$  наибольшей деформации КМ<sup>1)</sup>.

Когда имѣется гистерезисъ, то при увеличеніи деформации внутреннія силы поглощаютъ работу, измѣряемую площадью (фиг. 29)  $a'acbb'$ , при возвращеніи къ первоначальной формѣ упругія силы отдають работу  $b'bdaa'$ . Отданная работа теперь меньше поглощенной. Разность ихъ, т. е. работа, измѣряемая площадью петли



Фиг. 30.

гистерезиса  $acbda$ , даетъ работу не возвращенную брускомъ; это—энергія поглощенная имъ, и такое поглощеніе энергіи будетъ происходить при каждомъ циклѣ. При повтореніи большого числа цикловъ количество поглощенной энергіи можетъ составить значительную величину.

Куда дѣвается эта поглощенная брускомъ энергія? Во что она превращается въ брусѣ? Въ какомъ видѣ она проявится? Когда сдѣлалось извѣстнымъ существованіе упругаго гистерезиса, то нѣкоторые изслѣдователи полагали, что поглощенная при этомъ работа цѣликомъ идетъ на порчу, разрушеніе испытываемаго бруска, на разъединеніе частицъ, истираніе кристалловъ и т. д. Поэтому думали, что появленіе гистерезиса указываетъ на опасность; что при повторныхъ напряженіяхъ,

<sup>1)</sup> См. T. Muis. On the Recovery of Iron from Overstrain. Phil Tarns. A. Vol. 193 (1900 г.).



разрушеніе скоро достигнетъ замѣтныхъ размѣровъ, и брусокъ долженъ показать признаки усталости. Отсюда дѣлали выводъ: при повторныхъ напряженіяхъ можно допускать только такія силы, которыя не вызываютъ петлю гистерезиса.

Противъ этого взгляда было представлено слѣдующее возраженіе: легко можетъ быть, что поглощенная работа тратится не на разрушеніе бруска. Это конечно не исключаетъ возможности того, что, при увеличеніи гистерезиса, значительная часть его работы пойдетъ прямо на порчу металла, на разрушеніе его, на разстройство связи частицъ. Но небольшія петли гистерезиса могутъ быть безвредны, и появленіе ихъ не указываетъ на неминуемую опасность.

Новѣйшіе опыты заставляютъ склониться къ послѣднему мнѣнію. Турнеръ при опытахъ на выносливость убѣдился, что существованіе петли гистерезиса вполне совмѣстимо съ тѣмъ, что брусокъ окажется выносливымъ, можетъ выдержать произвольное число цикловъ напряженій безъ всякой порчи. Иногда при первыхъ сотняхъ цикловъ замѣчается нѣкоторое увеличеніе петли. Но затѣмъ металлъ получаетъ аккомодацию, приспособляется къ прилагаемому циклу напряженій, и увеличеніе петли прекращается, послѣ чего брусокъ выдерживаетъ, не уставая, миллионы цикловъ. Тоже получилъ и Bairstov (1911 г.), который послѣ обширныхъ опытовъ на выносливость, указываетъ, что полученіе петли гистерезиса не представляетъ непремѣннаго признака того, что при большомъ числѣ повтореній неминуемо должно произойти разрушеніе. Но при значительной величинѣ измѣненій напряженія металлъ не приспособляется, петля гистерезиса не получаетъ установившейся постоянной величины, и тогда, конечно, металлъ скоро устанетъ, и брусокъ будетъ разрушенъ послѣ нѣсколькихъ тысячъ, или даже сотенъ тысячъ приложенныхъ къ нему цикловъ.

Несомнѣнно, работа гистерезиса въ значительной части превращается въ теплоту. Это слѣдуетъ изъ опытовъ Турнера, и недавно тоже получилъ Б. Гопкинсонъ, который даже сдѣлалъ попытку сравнить численную величину выдѣливаемаго тепла съ той потерянной энер-

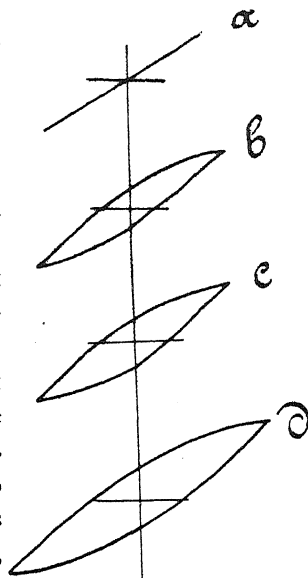
гійей, величина которой указывается площадью петли гистерезиса. Иногда у него температура бруска поднималась до 60—70 градусо́въ С.

Все это хорошо выясняется изъ одного примѣра, который я заимствую изъ опытовъ Bairstow'a. Беру испытанія на выносливость стали, которая примѣняется для вагонныхъ осей. Ея сопротивленіе разрыву равно 38,2 тонны на квадратный дюймъ, а критическая точка получается при 24,9 тонны на квадратный дюймъ. Брусокъ этой стали подвергался попеременнымъ растягивающимъ и сжимающимъ силамъ одинаковой величины, т. е. наибольшее напряженіе было численно равно, а по знаку противоположно наименьшему; слѣдовательно полная величина *измѣненія* напряженій была вдвое больше растягивающей силы. Результаты показаны схематически на слѣдующей фигурѣ 31, гдѣ представлены діаграммы, съ силами отложенными по оси абсциссъ, и съ удлиненіями—и со сжатіями—по оси ординатъ.

Когда силы измѣнялись въ предѣлахъ отъ  $+14,1$  тонны на квадратный дюймъ до  $-14,1$  тонны, то сначала получалась діаграмма формы *a*, (фиг. 31) въ видѣ прямой линіи; но послѣ нѣсколькихъ повтореній этого цикла образовалась небольшая петля *b*, которая, затѣмъ, при увеличеніи числа перемѣнъ оставалась неизмѣнной.

Нужно думать, что еслибы предѣлъ напряженій былъ еще меньше, то петли не получилось бы вовсе, и мы бы имѣли прямую (а) при произвольномъ числѣ повтореній. Bairstow полагаетъ, что это получилось бы, если бы силы измѣнялись въ предѣлахъ  $\pm 13$  тоннъ.

При слѣдующемъ опытѣ силы мѣнялись въ предѣлахъ  $\pm 15$  тоннъ на квадратный дюймъ. Петля получилась

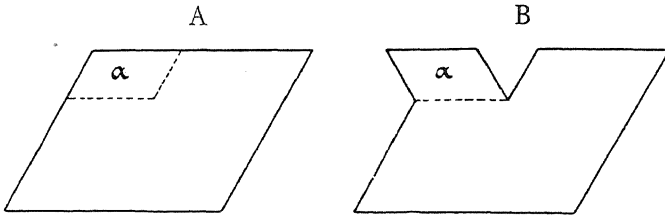


Фиг. 31.

какъ у  $c$ , т. е. значительно большая, чѣмъ для  $b$ , но разрушенія не произошло.

При измѣненіи силъ въ предѣлахъ  $\pm 20,2$  тонны на квадратный дюймъ, петля еще больше расширилась, какъ показано у  $d$ , но всетаки разрушенія не послѣдовало. Наконецъ, при измѣненіи напряженій въ предѣлахъ  $\pm 21,1$  тоннъ на квадратный дюймъ, брусокъ такой же стали выдержалъ всего 1200 цикловъ и разрушился.

Въ качествѣ другого примѣра укажемъ на опытъ со шведскимъ желѣзомъ, сопротивление разрыву котораго было 19,6 тонны на квадратный дюймъ, а критическая нагрузка 14,5 тоннъ на квадратный дюймъ. Нагрузка при пробѣ на выносливость мѣнялась между  $+8,9$  и  $-8,3$  тонны на квадратный дюймъ. Въ теченіе каждой минуты



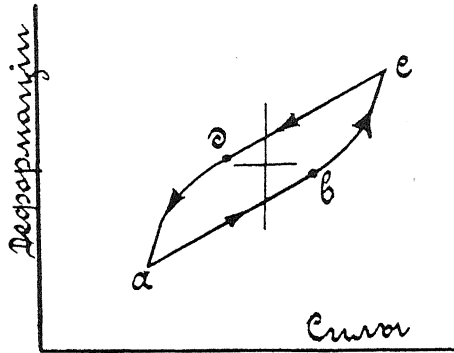
Фиг. 32.

происходило 1200 переменъ знака нагрузки. Послѣ 100000 переменъ появилась петля гистерезиса, и она оставалась неизмѣнной при повтореніи такихъ переменъ 100 000 000 разъ. Такъ какъ брусокъ при этомъ не разорвался, то такая нагрузка, несмотря на петлю, должна считаться безусловно безопасной, сколько бы разъ не происходила переменъ знака.

Подобную же картину измѣненій нужно ожидать и для другихъ металловъ. Посмотримъ теперь на явленіе гистерезиса съ точки зрѣнія кристаллическихъ скользящихъ, сдвиговъ. Обратимся къ опыту Баумгауэра. На фиг. 32 показаны два положенія равновѣсія А и В части кристалла  $a$ . Попробуемъ предсказать, какая получится зависимость между силой и перемѣщеніемъ, когда мы давленіемъ  $P$  переведемъ форму В въ положеніе, указанное А или обратно. Нужно полагать, что сначала часть  $a$  представитъ значительное упругое сопротивленіе, про-

порціональне величинѣ перемѣщенія, т. е. діаграма получится похожая на прямую лінію  $ab$  (фиг. 33). Но затѣмъ, когда часть  $a$  будетъ уже замѣтно выведена изъ своего устойчиваго положенія, напримѣръ, когда  $a$  станеть въ положеніе около средняго между случаями В и А, то деформація уже будетъ увеличиваться не пропорціонально силамъ, а замѣтно быстрее, т. е. вмѣсто прямой будетъ поднимающаяся кверху кривая  $bc$ , пока не получится положеніе равновѣсія, означенное буквой А.

Если теперь пойдёмъ обратно изъ положенія А въ В, то сначала будетъ пропорціональность между перемѣщеніями и силами, которая изобразится прямою  $cd$ , и надо



Фиг. 33.

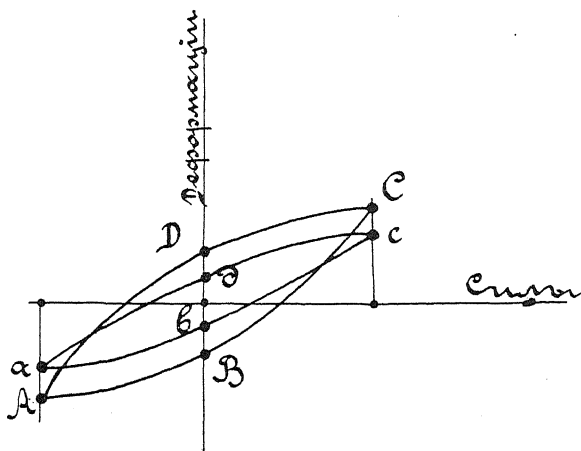
думать, что  $cd$  будетъ приблизительно параллельна  $ab$ . Далѣе перемѣщенія будутъ увеличиваться быстрее силъ, что представится кривою  $da$ .

Итакъ, петля гистерезиса должна имѣть такой видъ, какъ на фиг. 33. Она должна состоять изъ двухъ прямыхъ  $ab$ ,  $cd$  параллельныхъ между собою, и двухъ кривыхъ  $cb$ ,  $da$ .

Замѣчательно, что Bairstow, работая въ англійской Национальной Лабораторіи въ 1911 году, нашель для металловъ именно такую форму петли гистерезиса, т. е. двѣ параллельныя прямыя и двѣ кривыя.

Пусть напряжения мѣняются очень быстро, т. е. частота повторенія цикловъ очень велика (напримѣръ, при опытахъ Б. Гопкинсона, частота доходила до повторенія цикла 7000 разъ въ минуту). Тогда можно ожидать,

что за короткое время одной переменны циклъ не успѣтъ раскрыться на полную свою ширину, получающуюся при медленныхъ переменнахъ. Произойдетъ то, что схематически представлено на фиг. 34, т. е. вмѣсто широко раскрытой петли ABCD, отвѣчающей медленнымъ пере-



Фиг. 34.

мѣнамъ, при частыхъ переменнахъ получится для каждаго цикла узкая петля *abcd*. Конечно такая узкая петля менѣ вредна, чѣмъ широкая. Этимъ объясняется полученный Гопкинсономъ результатъ, а именно, что при тѣхъ же величинахъ напряженій, если частота переменнъ растетъ, то, послѣ известнаго предѣла, получается значительное увеличеніе числа выдерживаемыхъ брускомъ переменнъ напряженій.

Я думаю изъ всего этого мы вправѣ заключить, что явленія скольженія кристаллическаго вещества, петля гистерезиса и усталость металловъ находятся въ тѣсной взаимной связи.

