

**Хайдаров Геннадий Гасимович**

канд. техн. наук, доцент

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный  
технологический институт (технический университет)»

г. Санкт-Петербург, Россия

**ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ РАСЧЕТНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ  
ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛОВ ОТ ИХ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
ИЗ КОНЦЕПЦИИ «РАСПАКОВКИ» ВЕЩЕСТВА**

*Аннотация:* в статье теоретически получена оценочная зависимость предела прочности («Ultimate strength») от физических свойств твердого вещества: плотности, молекулярного веса, температуры плавления и энтальпии плавления. Зависимость объясняет их влияние на прочность материала из концепции «распаковки» вещества. Обоснована физическая граница применимости понятия «сила» из концепции механики Ньютона и отличие от концепции «распаковки». Данная зависимость по внешнему виду похожа на уравнение Клапейрона-Менделеева для идеального газа, но имеет другой физический смысл для предела прочности твердого вещества. Расчетная зависимость сравнивалась с табличными данными пределов прочности для 15 промышленных металлов. Зависимость позволяет объяснить и прогнозировать значения пределов прочности металлов периодической таблицы Менделеева.

*Ключевые слова:* физика, энергия, внутренняя энергия, вещество, распаковка, прочность, предел прочности, предел текучести, плотность, молекулярная масса, температура плавления, температура, энтальпия плавления, сила, теория, корреляция, формула.

*Введение.*

В законах механики Ньютона применяется физическое понятие «сила» («Force, in physics»). В некоторых задачах физики такой механистический подход не может привести к решению поставленной задачи. Например, процессы

плавления, кипения вещества, испарения вещества. В таких процессах происходит изменение внутренней энергии вещества, разрушение связей между частями вещества. Поэтому в физике кроме механики существуют другие ее разделы. Например, случай разрушения вещества до газообразного состояния. Для вещества в газообразном состоянии начинают применять другие формулы, закономерности, определения. Например, зависимость Клапейрона-Менделеева. Для описания такого состояния вещества или процесса будут применяться физические понятия «давление», «объем», а не «сила».

О различии в формулировке физических задач и их решений уже давно и много написано. Например, Норберт Винер в 1961 году в начале второй главы своей книги о кибернетике [1] сравнивал задачу механики по предсказуемости движения космических тел в астрономии с задачей метрологии об облачности, в которой нельзя подойти механическим путем.

Другой пример указания на ограниченность механики можно увидеть в работе профессор В. Эткина [2]. В данной работе автор развивает мысль о том, что если в физической задаче идет большое рассеивание энергии (диссипация энергии), то механический подход, аналогичный Ньютонской механики проблематичен.

И наконец, в качестве примера приведем, что считает Френк Вильчек в своей книге [3]. Автор утверждает о главенстве понятия энергии в физике. К такому выводу автор приходит, разбирая законы Эйнштейна.

Практичные люди уже давно придумали множество хороших решений для технических задач. Но для их теоретического объяснения часто еще применяется механистическая концепция Ньютона с понятием «сила». Даже для тех задач, где не выполняется основное условие справедливости понятия «сила». То есть там, где происходит значительное разрушения вещества.

*Условная граница применимости понятия «сила» механики Ньютона.*

Рассмотрим применимость концепции с понятием «сила» механики Ньютона с точки зрения решения прикладной задач определения прочности веще-

ства. Сравним такое решение этой задачи с решением, использующим концепцию «распаковки» вещества [4; 5] или молекулярно-энергетическим подходом к разрушению («распаковке») вещества [6].

Сравнивая эти две концепции можно провести четкую границу или определить предел, где будут главенствовать физические законы механики Ньютона с применением понятия «сила» и где заканчивается приоритет применимость законов механики. В механике принято рассматривать вещество как единое и неделимое целое, не разрушаемое твердое тело. В этом случае принято применять физическое понятия «сила». Название такой дисциплины, как «Теоретическая механика» («Analytical mechanics») хорошо подходит задач механики Ньютона с применением понятия «сила». Разрушение, поломка, разрыв, отделение частей тела рассматривается, как запредельный и недопустимый случай. Также в дисциплине «Соппротивление материалов» («Strength of materials») в случаях расчета упругих деформаций изучаются условия расчета конструкций без разрушения материала вещества. Задачей многих технических дисциплин является не допустить вещество (материал или металл) до состояния, приводящего к разрушению конструкции. Предельным случаем (а точнее, запредельным случаем) является разрыв образца материала для определения предела прочности материала. В технических терминах разрыв материала связывают с величиной «предел прочности» («Ultimate strength») материала, выше которого происходит необратимое разрушение материала. В этом запредельном случае в технике также принято применять понятие «сила» для вычисления данного предела прочности.

С точки зрения концепции молекулярно-энергетической распаковки вещества [4–6] идея механики сводится к допредельному состоянию, когда подводимая к веществу внутренняя энергия не приводит к разрушению тела, что является всего лишь допущением механики (незначительностью сил трения, малостью нагревания, отсутствием микротрещин, отсутствием разрушения и т. д.). Следует также отметить, что физическая модель молекулярно-

энергетической распаковки вещества не противоречит механики Ньютона, а занимает в механике Ньютона место в пределах погрешности вычислений, в допущениях механики (о незначительных величин сил трения, нагревания вещества при совершении работы, значений перемещений при упругой деформации и т. д.).

Учитывая большое прикладное значение в технике величины предел прочности материала, рассмотрим теоретический вывод данной величины из концепции «распаковки» вещества. С точки зрения концепции «распаковки» вещества (при молекулярно-энергетического подхода) разрушение материала является самым обычным явлением. Вся концепция «распаковки» вещества, впервые опубликованная в 1983 году [7], построена на разрушении вещества на отдельные составляющие. То есть верхняя граница применимости механики Ньютона с точки зрения увеличения внутренней энергии вещества, является нижней границей начала существенного влияния концепции «распаковки» вещества в твердом теле. Пограничным состоянием с точки зрения внутренней энергии, как раз и является хорошо известная в технике величина предела прочности вещества («Ultimate strength»). На основании этих рассуждений применим к выводу теоретической зависимости предела прочности вещества от физических свойств вещества концепцию «распаковки» вещества. Чтобы не повторять все ранее изложенные теоретические положения и выводы концепции «распаковки» вещества [4–8], будем использовать уже полученные ранее формулы и закономерности в готовом виде.

#### *Цель работы.*

Целью данной публикации является теоретическое представление предела прочности («Ultimate strength») и предела текучести («Yield strength») материала от физических свойств веществ. Обоснование расчетной оценочной зависимости предела прочности от физических величин: плотность, молекулярная масса, температура плавления, температура кипения, критическая температура, энтальпия плавления. А также на основании полученной теоретической зави-

симости со справочными табличными значениями для промышленных металлов предсказания сравнительных пределов прочности металлов.

*Основная часть.*

Теоретический вывод предела прочности и сравнения значений с экспериментальными табличными данными из справочника для 15 металлов был опубликован на английском языке в работе [9]. Табличные данные для промышленных металлов были взяты из источника [10].

Кратко повторим основной алгоритм этого вывода [9]:

1. Была уточнена связь концепции механики Ньютона в предельном его состоянии – пределе текучести металла (как части предела прочности металла) с концепцией распаковки, следствия которой изложены в работах [9]. На основании чего было обосновано использование зависимости концепции распаковки.

2. Была взята полученная зависимость из концепции «распаковки» уравнение. А именно, зависимости поверхностного натяжения от температуры [8] в диапазоне от текущей температуры твердой фазы вещества до температуры плавления.

3. Далее, используя концепцию «распаковки» вещества, было применено определение давления через энергию вещества [8]. То есть давление можно было записать, как разности энергий деленное на объем поверхностного слоя вещества.

В результате была выведена формула (1) по внешнему виду аналогичная уравнению Клайперона–Менделеева для идеального газа. Но формула получена для твердой фазы вещества в согласовании с концепцией Ф. Вильчека [3] о главенстве энергии в физическом процессе. В данном конкретном случае, о главенстве внутренней энергии для твердого вещества. Подробный вывод формулы описан в работе [9].

$$\Delta P = P - P_{m.} = \rho \cdot R_u / M \cdot (T_m. - T), \quad (1)$$

где  $\Delta P = P - P_{m.}$  – избыточное давление в твердом веществе, Па;

$\rho$  – плотность вещества, кг/м<sup>3</sup>;

$R_u$  – универсальная газовая постоянная, Дж/ (моль\*К) ;

$T_m$ . – температура плавления (melting point), градусы Кельвина;

$T$  – текущая температура, градусы Кельвина;

$M$  – молекулярная масса, кг/моль.

Применительно к твердому веществу полученная формула имеет физический смысл прочности вещества на растяжение. То есть, так называемое изменение давления на сечение вещества, необходимое на совершение работы по разрушению сечения металлического (или твердого) образца материала с появлением текучести объема одноатомного (или одномолекулярного) слоя вещества. В технике такое давление принято назвать «напряжением» («Stress» continuum mechanics), и его размерность определяется через значение физического понятия «сила» («force») деленной на площадь поперечного сечения вещества. Размерность данного понятия «напряжения» – Па (Паскали).

Это может показаться не совсем привычно, но единственное отличие данного определения «предела прочности» состоит в том, что от Ньютоновского понятия «сила» мы перешли к понятию внутренней энергии вещества, применяемому согласно концепции «распаковки» вещества. То есть, раз есть разрушение «распаковка» вещества, то применять понятие «сила» становится не совсем логично. В остальном никаких существенных отличий нет. Данный подход дает формулу предела прочности (или временное сопротивление) материала (или Ultimate strength), как

$$\sigma_{\text{uts.}} = \Delta P = \rho \cdot R_u / M \cdot (T_m - T), \quad (2)$$

где  $\sigma_{\text{uts.}}$  – предел прочности вещества на разрыв (Ultimate tensile strength), Па.

В технике принято разделять понятия предел прочности (Ultimate strength) вещества ( $\sigma_{\text{uts.}}$ ) и предел текучести (Yield strength) вещества ( $\sigma_y$  ). Так как в испытаниях по разрушению образца металла замечено, что на начальной стадии металл, как бы течёт. Для металлов данные пределы связаны эмпирической формулой

$$\sigma_y = K \cdot \sigma_{\text{uts.}} \quad (3)$$

Значение величины предела текучести меньше предела прочности на коэффициент пропорциональности  $K$ . Например, для стали марки «Ст. 3сп ГОСТ 380-2005» значение  $K=0,51–0,55$ , то есть предел текучести данной марки стали в два раза меньше предела прочности. Из физического понимания процесса более правильно будет переписать формулу (2) к виду

$$\sigma_y = \Delta P = \rho \cdot R_u / M \cdot (T_m - T). \quad (4)$$

Поэтому практическое применение теоретических формул (2) и (4) имеет оценочный сравнительный характер.

Вместе с тем данный вывод теоретических формул (2) и (4) имеет несколько важных результатов:

1. В работе [9] теоретически получен аналог по внешнему виду уравнения Клапейрона-Менделеева для случая разрыва («распаковки») твердого вещества формулы (1), (2).

2. Анализ формулы (2) позволяет однозначно связать с точностью до эмпирического коэффициента пропорциональности ( $K$ ) по формулам (3) и (4) прочность материала с физическими справочными свойствами веществ: плотностью, молекулярным весом, температурой плавления. То есть объясняет их влияние на прочность материала.

3. Применение понятия внутренней энергии вещества при теоретическом выводе формулы (2) позволяет также применить не только величину температуру плавления, но и включить в данную формулу величину энтальпии плавления [5].

*Сравнение теоретических результатов расчета предела прочности со справочными с экспериментальными данными металлов.*

Для подтверждения теоретически полученных зависимостей (2)–(4) в работе [9] были рассмотрены справочные данные для 15 металлов, имеющих большое значение в технике. Расчётные значения сравнивались с справочными табличными данными. Данные пределов прочности этих металлов были взяты с технического сайта в интернете [10] для металлов: алюминий, бериллий,

вольфрам, железо, кадмий, кобальт, магний, медь, молибден, никель, ниобий, олово, свинец, титан, цирконий.

Сравнение максимальных теоретических значений пределов прочности по формуле (2) со справочными значениями пределов прочности промышленных металлов позволили найти коэффициент пропорциональности –  $K=0,2$  согласующий теоретические и справочные данные пределов прочности.

Результаты расчетов пределов прочности (при  $T=0$  градусов Кельвина) по уравнению (2) и табличных данных приведены в виде графиков на рисунке 1. Красным цветом указана линия графика максимального теоретического значения предела прочности ( $\sigma_{UTS, theoretical1}$ ) по формуле (2). Синим цветом указана линия графика опытных значений испытаний предела прочности промышленных металлов по табличным данным [10]. Зеленым цветом указана линия графика расчетная теоретическая зависимость по формуле (3) с коэффициентом пропорциональности  $K=0,2$ , то есть теоретическое максимальное значение предела прочности, умноженное на  $K=0,2$ . На рисунке 2 приведен график сравнения [9] с этим коэффициентом. Из сравнения графиков теоретических и справочных табличных значений однозначно прослеживается наложение «пиков» и «впадин» на графиках.

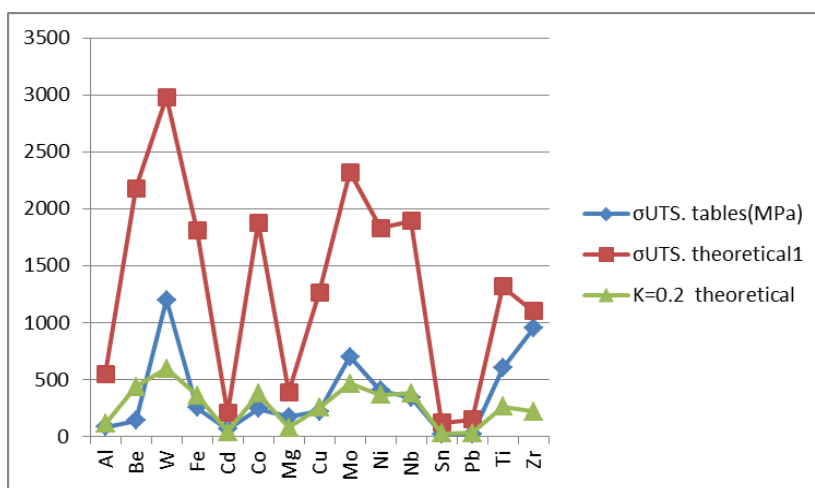


Рис. 1. Сравнение максимального теоретического значения предела прочности ( $\sigma_{UTS, theoretical1}$ ) по формуле (2), теоретического предела прочности ( $\sigma_{UTS,$



---

theoretical1 при  $K=0.2$ ) по формуле (3), справочного табличного предела прочности ( $\sigma_{UTS}$ . tables(MPa))

*Прогнозирование значения предела прочности химических элементов.*

Теперь рассчитаем теоретические пределы прочности простых веществ в твёрдом состоянии в диапазоне температур до температуры плавления для химических элементов от номера 1 (Водород) до номера 94 (Плутоний). Для расчета используем известные свойства химических элементов периодической таблицы химических элементов [11], имеющиеся в интернете. Концепция распаковки позволяет производить оценочные расчеты через четыре взаимосвязанные и взаимозаменяемые формулы [12–14] с использованием: температуру плавления, температуру кипения, критическую температуру, энтальпию плавления. Используя такой подход к решению задачи возможно производить оценочные теоретические расчеты даже при неполном наборе всех справочных данных о веществе. В случае, когда вещество находится при нормальных условиях, в жидком или газообразном состоянии, данные расчеты не представляют практического интереса. Зато для металлов, сравнение теоретических значений пределов прочности представляет большой практический интерес.

На рисунке 2 приведены оценочные расчеты максимального предела прочности веществ в твердой фазе (до температуры плавления) при значении коэффициента пропорциональности  $K=0,2$  по трем взаимосвязанным и взаимозаменяемым теоретически формулам: с температурой плавления (P1\_02), с температурой кипения (P2\_02), с энтальпией плавления (P4\_02). А также на рисунке 3 нанесены справочные экспериментальные данные для 15 промышленных металлов [10].

График сравнительной оценки пределов прочности показывает сравнительные характеристики пределов прочности металлов из концепции «распаковки». Из полученного на рисунке 2 графика можно объяснить и спрогнозировать высокие прочностные свойства металлов. Следует ожидать высокие значе-

ния предела прочности для следующих металлов с номерами в периодической таблице Менделеева: номера 74–79 (Вольфрам, Рений, Осмий, Иридий, Платина, Золото), номера 42–46 (Молибден, Технеций, Рутений, Родий, Палладий), номера 24–28 (Хром, Марганец, Железо, Кобальт, Никель). То есть наибольшие значения предела прочности по предлагаемой в данной работе теоретической формуле (2) приходится на химические элементы – металлы 6–10 группы периодической таблицы Менделеева. А также элементов с номерами 5, 6 (Бор, Углерод).

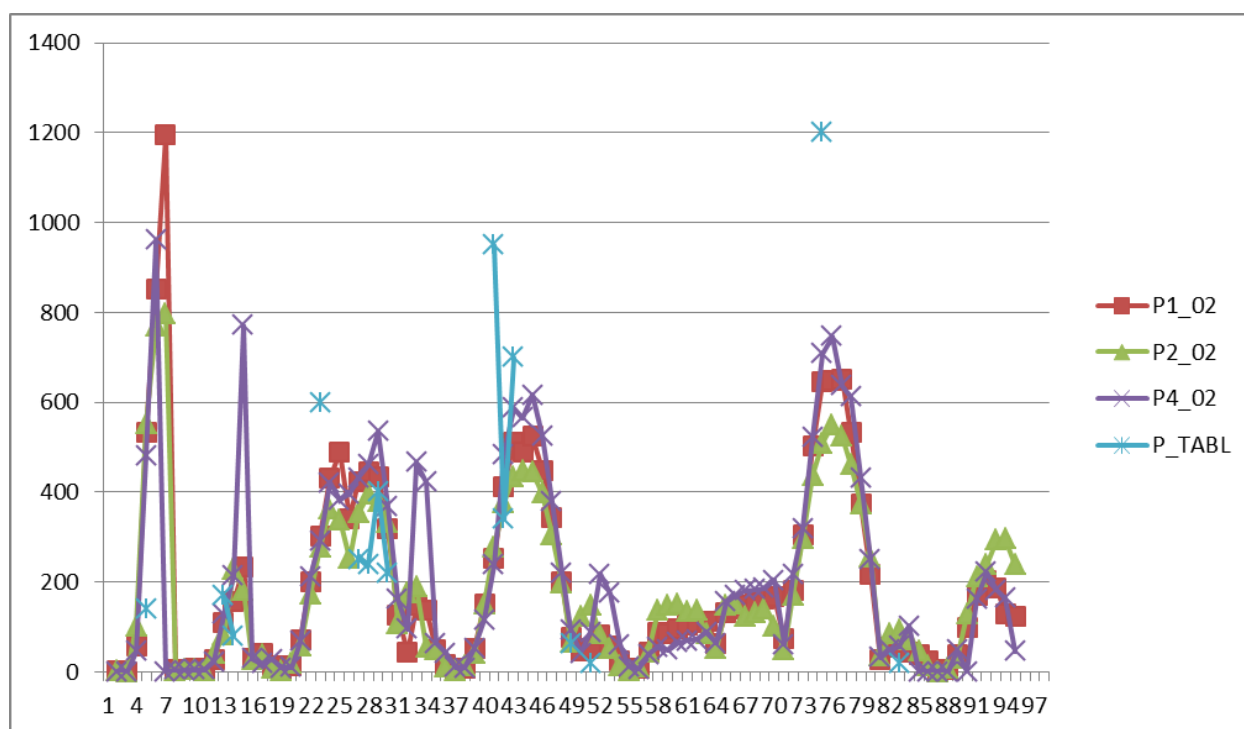


Рисунок 2. Сравнение максимального теоретического значения предела прочности при  $R=0,2$  по формулам: с температурой плавления (P1\_02), с температурой кипения (P2\_02), с энтальпией плавления (P4\_02) и табличным экспериментальным значение (P\_TABL) в МегаПаскалях

*Выводы.*

При использовании концепции «распаковки» для теоретического вывода формулы для предела прочности и предела текучести вещества появляется возможность.

1. Получить теоретическую взаимосвязь предела прочности вещества от совокупности физических величин: плотности вещества, молекулярной массы вещества, температуры плавления вещества (а также температуры кипения и критической температуры), удельной энтальпии плавления вещества. То есть выявить основные физические свойства вещества, влияющие на прочность материала.

2. Получить теоретическую зависимость для сравнительного оценочного расчета предела прочности твердого вещества. Зависимость по форме аналогична зависимости Кларейрона-Менделеева для идеального газа, но имеет другой физический смысл.

3. Для понятия «сила» в законах механики Ньютона найти условную границу применимости, которой является существенное разрушение («распаковка») вещества.

4. Дать сравнительные данные по пределам прочности веществ от 1 до 94 элемента периодической таблицы Менделеева.

### ***Список литературы***

1. Khaidarov G.G. Dependence of ultimate strength on the physical properties of a substance and expansion of the application of the Clapeyron-Mendeleev Law from the «unpacking» concept of a Substance // International Conference «Scientific research of the SCO countries: synergy and integration». Juli 17, 2024. Beijing, PRC. P. 174–181. DOI 10.34660/INF.2024.30.74.047. EDN BUMCHD

2. Khaidarov G.G. Results of applying the concept of «unpacking» a substance and its connection with the internal energy of a substance // International Conference «Scientific research of the SCO countries: synergy and integration». Part 1. April 26, 2024. Beijing, PRC. P. 183–189. DOI 10.34660/INF.2024.98.47.194. EDN LNTDYO

3. Khaidarov G.G., Khaidarov A.G. The Relationship Between Melting Point, Boiling Point and Critical Point // Intellectual Archive. 2016. Vol. 5. No. 2. P. 15–19.

4. Вильчек Ф. Тонкая физика. Масса, эфир и объединение всемирных сил / Ф. Вильчек. – СПб.: Питер, 2017. – 328 с.

5. Винер Н. Кибернетика или управление и связь в животном и машине / Н. Винер; пер. с англ. И.В. Соловьева, Г.Н. Поварова; под ред. Г.Н. Поварова. – 2-е изд., – М.: Советское радио, 1968. – 328 с.

6. Периодическая система химических элементов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Периодическая\\_система\\_химических\\_элементов](https://ru.wikipedia.org/wiki/Периодическая_система_химических_элементов) (дата обращения: 26.08.2024).

7. ППС центр проектирования. Таблица предела прочности металлов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.center-pss.ru/st/st166.htm> (дата обращения: 01.07.2024).

8. Хайдаров Г.Г. Физическая природа поверхностного натяжения жидкости / Г.Г. Хайдаров, А.Г. Хайдаров, А.Ч. Машек // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 4: (Физика, химия). 2011. – Вып. 1. – С. 3–8. EDN NEHNJX

9. Хайдаров Г.Г. О связи поверхностного натяжения жидкости с теплотой парообразования / Г.Г. Хайдаров // Журн. физ. химии. – 1983. – Т. 57. №10. – С. 2528–2530.

10. Хайдаров Г.Г. Объяснение процессов плавления, кипения, испарения вещества из физической модели молекулярно-энергетической распаковки вещества. – Известия СПбГТИ(ТУ). – 2023. – №64 (90). – С. 8–12. – DOI 10.36807/1998-9849-2023-64-90-8-12. – EDN GYGXMX

11. Хайдаров Г.Г. Молекулярно-энергетическая концепция распаковки вещества / Г.Г. Хайдаров, А.Г. Хайдаров // Интерактивная наука. – 2021. – №1 (56). – С. 8–12. DOI 10.21661/r-552957. EDN WKYYXM

12. Хайдаров Г.Г. Влияние температуры на поверхностное натяжения / Г.Г. Хайдаров, А.Г. Хайдаров, А.Ч. Машек, Е.Е. Майоров // Вестник Санкт-

Петербургского университета. Серия 4 (Физика, химия). – 2012. – Вып. 1. с. 24–28.

13. Эткин В. Паралогизмы термодинамики. О недостатках изложения и трудностях понимания термодинамики / В. Эткин. – Palmarium academic publishing, 2015. – 353 с.