

УДК 620.178

**В. Н. Кудрявцев**, канд. техн. наук, доц., **В. А. Парамонова**, канд. техн. наук, доц.  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия  
Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-  
Барановского, ДНР, Россия  
Тел./Факс: +7981-806-89-79; E-mail: kudryavtsevvn@mail.ru

## РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НЕКОТОРЫХ НОРМАЛИЗОВАННЫХ СТАЛЕЙ

*В работе представлены модели для расчёта основных механических свойств нормализованных сталей (допускаемые напряжения - среза, кручения, растяжения, изгиба и смятия, а также пределы текучести и прочности при растяжении) от содержания в их составе углерода, полученные аналитическими и расчётными методами при обработке справочных таблиц. Отмечено практически полное совпадение кривой твёрдости для нормализованной стали (в единицах твёрдости HB) и кривой, описывающей допускаемое напряжение изгиба (МПа).*

**Ключевые слова:** нормализованная сталь, содержание углерода, механические свойства.

V.N. Kudryavtsev, V.A. Paramonova

## COMPUTATIONAL MODELS FOR DETERMINING THE MECHANICAL PROPERTIES OF SOME NORMALIZED STEELS

*Annotation The paper presents models for calculating the basic mechanical properties of normalized steels (allowable stresses - shear, torsion, stretching, bending and crumpling, as well as yield strength and tensile strength) from the carbon content in their composition, obtained by analytical and computational methods when processing reference tables. An almost complete coincidence of the hardness curve for normalized steel (in units of hardness HB) and the curve describing the allowable bending stress (MPa) is noted.*

**Keywords:** normalized steel, carbon content, mechanical properties.

### 1. Введение

Одним из важных этапов проектирования различных конструкций, машин и аппаратов является расчёт обеспечения их прочности. Оценка возможности развития в несущих элементах конструкций различных видов разрушений (износ; деформации и изломы; химико-тепловые; электрофизические и электрохимические повреждения) осуществляется на этапе их проектирования (путём принятия коэффициентов запаса).

Среди основных механических свойств материалов особое внимание уделяют различным видам прочности и пределу прочности, пределу текучести, жёсткости и твёрдости.

Для описания материалов, обладающих упругими свойствами, применяют такое свойство как предел текучести, характеризующийся максимальным растягивающим напряжением, которое материал может выдержать до необратимой деформации.

Способность тела (конструктивного элемента) оказывать сопротивление упругой деформации при приложении нагрузки характеризует величина жёсткости.

Значения твёрдости поверхности деталей конструкции, выраженные через сопротивление внедрению более твёрдого тела, характеризуют устойчивость к локализованной деформации поверхности.

Прочность характеризует величину напряжения, которое может быть приложено к телу с целью его деформации или поломки. Максимальное значение напряжения, при котором возникает разрушение тела, принято называть пределом прочности  $\sigma_B$ .

Способность материала сопротивляться разрушению под действием напряжений, возникающих под воздействием внешних сил, как правило, оценивают по значениям прочности материала, из которого изготовлена деталь [1].

Основные механические характеристики материалов конструкций позволяют прогнозировать срок их эксплуатации, долговечность, износостойкость рабочих узлов и другие эксплуатационные характеристики, что играет существенную роль при проектировании различных видов оборудования, включая машины и аппараты для пищевой промышленности, работающие в условиях агрессивных сред [2, 3, 4].

Для определения таких прочностных свойств материалов как предел упругости, предел текучести и предел прочности (временное сопротивление) проводят испытания на статические нагрузки, при этом определение прочности осуществляют тестированием шаблонных образцов (круглой или прямоугольной формы). По результатам исследований строится диаграмма, показывающая зависимость деформации образца от прикладываемого напряжения. Методы механических испытаний материалов регламентируют соответствующие стандарты, среди которых ГОСТ 9454-78, ГОСТ 25.503-97, ГОСТ 1497-84 (ISO 6892-84), ГОСТ 25.502-79 и др. [3, 4, 5, 6, 7].

Следует отметить, что все механические свойства зависят как от состава материала, так и от способа его обработки, при этом основные свойства сталей (допускаемые напряжения растяжения, среза, изгиба, кручения, смятия и твёрдость) являются взаимозависимыми и взаимообусловленными.

Целью статьи является получение моделей с упрощённым расчётным аппаратом для расчёта основных механических свойств нормализованных сталей (допускаемые напряжения - среза, кручения, растяжения, изгиба и смятия, а также пределы текучести, прочности при растяжении и твёрдости) от содержания в их составе углерода во взаимообусловленном контексте.

## 2. Основное содержание и результаты работы

Для достижения поставленной цели использовали аналитические и расчётные методы при обработке справочных таблиц, поиск закономерностей выполняли при помощи Пакета анализа MS Excel и MathCAD.

Конструктивные элементы машин и аппаратов, изготовленные из различных материалов и видов сталей, в частности, в процессе эксплуатации, часто, подвергаются значительным нагрузкам силой (силами) и/или моментом (моментами), приводящими к возникновению напряжений растяжения, сжатия и другим видам напряжений как нормального, так тангенциального и смешенного направлений. Воздействующие на детали и узлы усилия могут быть статическими и динамическими. Также значительную роль при создании напряжений играют моменты. В связи с этим, для обеспечения долговечности и прочности машин и аппаратов на этапе проектирования выбирают наиболее подходящие по механическим свойствам материалы, соответствующие запланированным эксплуатационным нагрузкам с необходимым запасом прочности.

Для получения гармонизированных и взаимообусловленных данных по характеристикам сталей, в работе был проведён анализ справочных данных структурированных в таблицы для нормализованных сталей [5, 6]. Для анализа изменения механических свойств нормализованных сталей от количества углерода в их составе, справочные данные были сведены в табл. 1. При данном анализе материаловедческая информация о структурных изменениях материала при термической обработке сведена к минимуму.

На рис. 1 приведены графики, построенные по данным основных механических свойств нормализованных сталей (допускаемые напряжения, МПа – среза  $\sigma_{ср}$ , кручения

$\sigma_{кр}$ , растяжения  $\sigma_p$ , изгиба  $\sigma_{изг}$  и смятия  $\sigma_{см}$ , а также пределы текучести  $\sigma_m$ , прочности при растяжении  $\sigma_b$  и твёрдости сталей по НВ) от содержания в их составе углерода. Для удобства совместного анализа на одном графике, величины приведены к одинаковой размерности (пояснение к столбцу твёрдости и коэффициенту в этом столбце).

Таблица 1. – Механические свойства некоторых марок нормализованных сталей

Марка	C, %·10 <sup>2</sup>	$\sigma_{ср}$ , МПа	$\sigma_{кр}$ , МПа	$\sigma_p$ , МПа	$\sigma_{изг}$ , МПа	$\sigma_{см}$ , МПа	Твёрдость НВ×10 <sup>-1</sup> , МПа (без терм обр)	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа
Сталь 8	8	58,84	78,45	107,87	127,49	161,81	131	320	196
Сталь 10	10	63,74	78,45	107,87	142,20	161,81	143	330	205
Сталь 15	15	73,55	93,16	122,58	147,10	181,42	149	370	225
Сталь 20	20	83,36	102,97	137,29	166,71	205,94	163	410	245
Сталь 25	25	88,26	107,87	147,10	176,52	215,75	170	450	275
Сталь 30	30	98,07	122,58	161,81	196,13	235,36	179	490	295
Сталь 35	35	107,87	132,39	176,52	205,94	264,78	207	530	315
Сталь 40	40	112,78	137,29	186,33	225,55	274,59	217	570	335
Сталь 45	45	122,58	147,10	196,13	235,36	294,20	229	600	355
Сталь 50	50	122,58	156,91	205,94	245,17	304,01	241	630	375

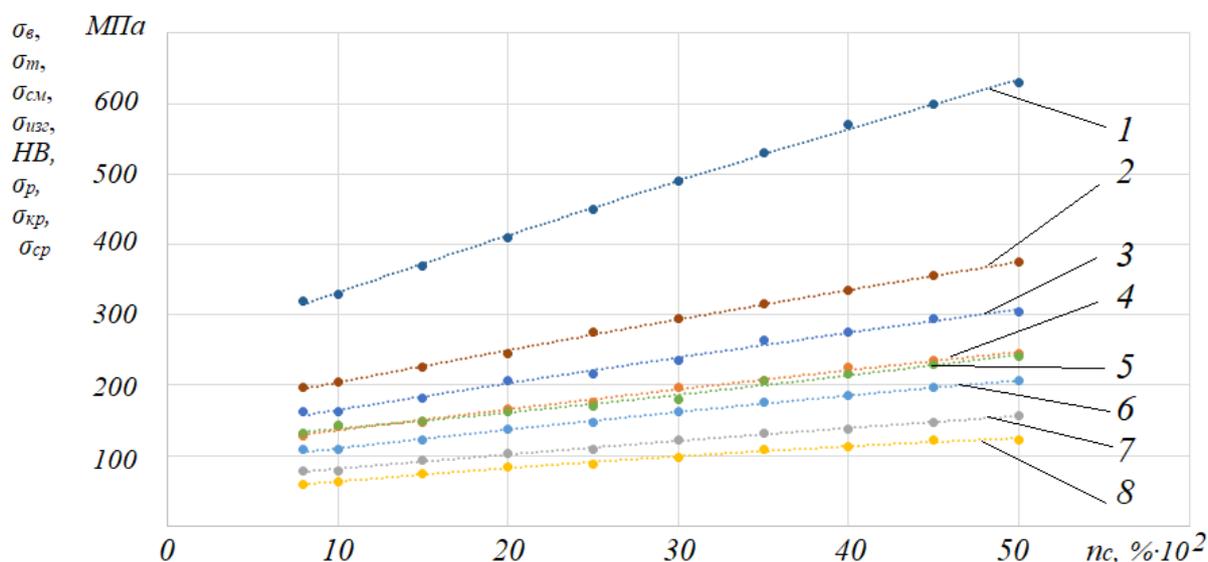


Рисунок 1. График зависимости механических свойств нормализованных сталей от содержания в их составе углерода:

1 –  $\sigma_b$ , 2 –  $\sigma_m$ , 3 –  $\sigma_{см}$ , 4 –  $\sigma_{изг}$ , 5 – НВ, 6 –  $\sigma_p$ , 7 –  $\sigma_{кр}$ , 8 –  $\sigma_{ср}$

Данные зависимости, как известно, носят натуральнологарифмический характер, что усложняет расчётный аппарат. Возможно применение линейнографической аппроксимации, однако при этом возрастает погрешность полученных расчётных величин. Для упрощения расчёта и сохранения точности полученных данных целесообразно использование параболических зависимостей. Это подтверждено сравнительным анализом множественных коэффициентов корреляций.

По полученным графикам, с учётом выше изложенного, были построены аппроксимирующие сглаживающие кривые, уравнения которых представлены формулами (1)-(8) (величина достоверности аппроксимации кривых для всех зависимостей  $R^2 = 0,98$ ):

$$\sigma_{\sigma} = -0,0189 \cdot n_C^2 + 8,6939 \cdot n_C + 246,59 \quad (1)$$

$$\sigma_m = -0,0095 \cdot n_C^2 + 4,8479 \cdot n_C + 156,47 \quad (2)$$

$$\sigma_{\sigma_{\text{см}}} = -0,0073 \cdot n_C^2 + 4,0128 \cdot n_C + 125,45 \quad (3)$$

$$\sigma_{\text{изг}} = -0,0059 \cdot n_C^2 + 3,1365 \cdot n_C + 105,31 \quad (4)$$

$$HB = -0,0111 \cdot n_C^2 + 1,9656 \cdot n_C + 117,5 \quad (5)$$

$$\sigma_p = -0,0081 \cdot n_C^2 + 2,9083 \cdot n_C + 81,938 \quad (6)$$

$$\sigma_{\text{кр}} = -0,0057 \cdot n_C^2 + 2,2137 \cdot n_C + 59,642 \quad (7)$$

$$\sigma_{\text{ср}} = -0,0124 \cdot n_C^2 + 2,2824 \cdot n_C + 41,661 \quad (8)$$

Как видно из графиков механических свойств нормализованных сталей наименьшее сопротивление нормализованные стали оказывают процессу резания и более эффективно материал сопротивляется смятию.

Следует особо отметить, что графики, характеризующие допустимое напряжение изгиба и твёрдость нормированных сталей по шкале Бринелля практически накладываются друг на друга, что может являться следствием применяемой для определения твёрдости методики – вдавливание шарика в поверхностный слой вызывает сопротивление аналогичное, возникающему при изгибе, что, в целом, позволяет применять для твёрдости размерность МПа и использовать для определения данных величин любое их полученных выражений (4) или (5). С целью проверки данного предположения аналогичные графики (рис. 2) и зависимости (9)-(14) были построены для нормализованных сталей, содержащих марганец Mn.

Для анализа изменения механических свойств нормализованных сталей, содержащих марганец Mn, от количества углерода в их составе, справочные данные были сведены в табл. 2.

Таблица 2. – Механические свойства некоторых марок нормализованных сталей

Марка	C, % · 10 <sup>2</sup>	$\sigma_{\text{ср}}$ , МПа	$\sigma_{\text{кр}}$ , МПа	$\sigma_p$ , МПа	$\sigma_{\text{изг}}$ , МПа	$\sigma_{\text{см}}$ , МПа	Твёрдость HBx10 <sup>-1</sup> , МПа (без терм обр)
Сталь 20Г	20	88,26	107,87	147,10	176,52	215,75	197
Сталь 30Г	30	107,87	132,39	176,52	205,94	264,78	217
Сталь 40Г	40	117,68	147,10	196,13	235,36	294,20	229
Сталь 50Г	50	127,49	156,91	205,94	254,97	313,81	255
Сталь 65Г	65	142,20	181,42	235,36	284,39	353,04	285

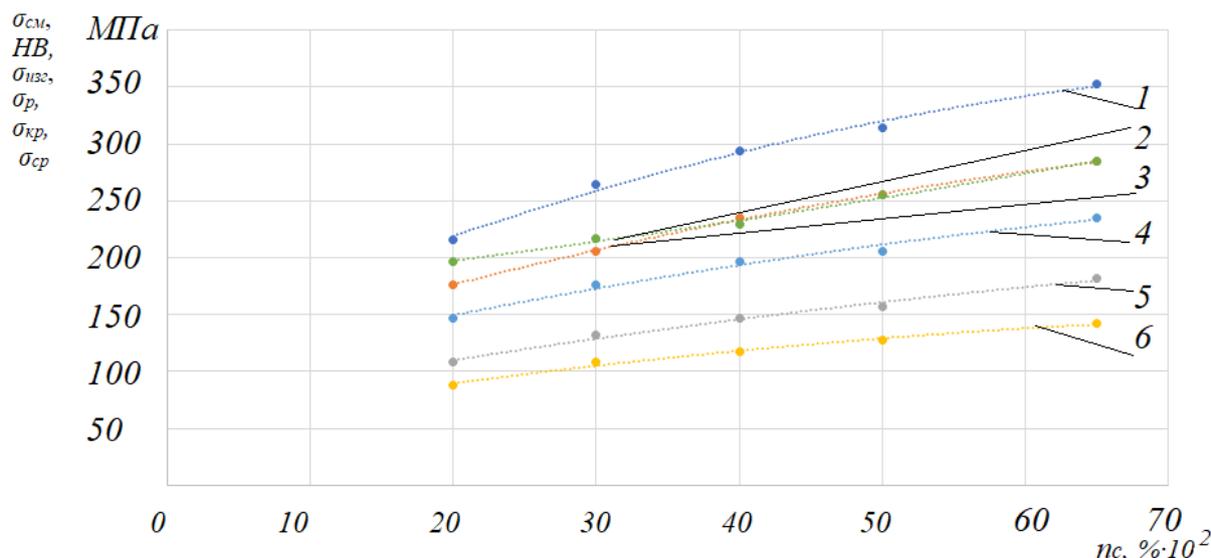


Рисунок 2. График зависимости механических свойств нормализованных сталей, содержащих марганец от содержания в их составе углерода:

1 –  $\sigma_{см}$ , 2 –  $HV$ , 3 –  $\sigma_{изг}$ , 4 –  $\sigma_p$ , 5 –  $\sigma_{кр}$ , 6 –  $\sigma_{ср}$

Величина достоверности аппроксимации кривых для всех зависимостей  $R^2 = 0,99$ :

$$\sigma_{см} = - 0,0298 \cdot n_c^2 + 5,4557 \cdot n_c + 121,94 \tag{9}$$

$$\sigma_{изг} = - 0,0183 \cdot n_c^2 + 3,9506 \cdot n_c + 104,76 \tag{10}$$

$$HV = - 0,0076 \cdot n_c^2 + 1,3069 \cdot n_c + 168,44 \tag{11}$$

$$\sigma_p = - 0,0135 \cdot n_c^2 + 3,0188 \cdot n_c + 94,497 \tag{12}$$

$$\sigma_{кр} = - 0,0096 \cdot n_c^2 + 2,376 \cdot n_c + 66,252 \tag{13}$$

$$\sigma_{ср} = - 0,011 \cdot n_c^2 + 2,0851 \cdot n_c + 52,339 \tag{14}$$

Как видно из полученных графиков кривые твёрдости и допускаемого напряжения изгиба также сопоставимы, а небольшое отклонение данных при содержании углерода 0,2% и 0,3% может быть следствием получения данных из различных источников. Для целого ряда сталей часть значений по механическим свойствам в справочниках отсутствует, отсутствующие в справочниках [5, 6] данные для сталей, содержащих марганец Mn, были приняты по таблицам для проката ГОСТ 1577-93 (при этом в ГОСТ указаны максимально возможные значения твёрдости).

### 3. Заключение

Полученные в работе зависимости между механическими свойствами сталей и содержанием в ней углерода (в диапазоне от 0,08 % до 0,5% для конструкционных сталей и от 0,2% до 0,65% сталей с 1% содержанием марганца) целесообразно использовать на этапе эскизного проекта при конструировании различных машин и аппаратов, а также для прогнозирования характеристик сталей при различных несущественных отклонениях в технологии, либо других причинах изменения состава углерода в нормализованных сталях. Полученные зависимости позволяют упростить расчёты в САПР, исключая необходимость сопоставления данных в справочных источниках, включая базы данных для САПР.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Tessa Axsom. Engineering Fundamentals Refresh: Strength vs. Stiffness vs. Hardness / Tessa Axsom // Resource Center Fictiv. Design guides, workflow tips, industry reports and more [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.fictiv.com/articles/engineering-fundamentals-refresh-strength-vs-stiffness-vs-hardness>
2. Кудрявцев, В. Н. Особенности проектирования элементов мясоизмельчительного оборудования с учётом достижений в сферах материаловедения и конструирования / В. Н. Кудрявцев, В. А. Парамонова, О. В. Губяк // Оборудование и технологии пищевых производств: темат. сб. науч. раб.: гл. ред. И.Н. Заплетников. - Донецк: Дон-НУЭТ, 2020. – Вып. 10(43). – С.18-27.
3. Jahazi M. The influence of hot rolling parameters on the microstructure and mechanical properties of an ultra-high strength steel / M Jahazi, B Egbali // Article in Journal of Materials Processing Technology, published June 2000 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.atlantis-press.com/proceedings/lemcs-15/25838158> – DOI: 10.1016/s0924-0136(00)00474-x
4. Yongli Chen. Application and Progress of Microstructure and Mechanical properties Control Methods for Ultra-High Strength Steel in Rolling Process / Yongli Chen, Xuejiao Zhou, Yuhua Li // Journal of Physics: Conference Series [Электронный ресурс]. - 1637 (2020) 012022 – Режим доступа: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1637/1/012022/pdf> – DOI: 10.1088/1742-6596/1637/1/012022.
5. Анурьев, В. И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3-х т. Т. 1. – 9-е изд., перераб. и доп. / под ред. И.Н. Жестковой. – М.: Машиностроение, 2006. – 928 с.
6. Сорокин, В. Г. Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин, А. В. Волосникова, С. А. Вяткин и др. – М: Машиностроение, 1989 – 640 с.
7. Горбунов, А. Методы измерения твёрдости металлов / А. Горбунов // Журнал Sterbrust.tech - технические новости, статьи, и книги: станки, оборудование, инструмент, технологии [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://sterbrust.tech/tehnologii/izmerenie-tverdosti.html>.

Поступила в редколлегию 25.03.2023 г.