

УДК 621.9

## **Влияние рассеивания твердости поковок на энергоемкость механической обработки**

Малькова Л. Д.<sup>1,\*</sup>

[\\*ludmma@yandex.ru](mailto:ludmma@yandex.ru)

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

---

Целью представленной работы является оценка рассеивания твердости поковок, предназначенных для дальнейшей механической обработки, и анализ влияния этого рассеивания на результирующее энергопотребление при резании. Проведено исследование значений твердости на трех видах деталей автомобильного производства. Анализ результатов измерений показал, что требуемому по рабочему чертежу заготовки диапазону удовлетворяют от 46% до 93% деталей. Установлено, что твердость поковок одной партии подвержена рассеиванию, ее распределение подчиняется нормальному закону. Значение коэффициента вариации для выборок, удовлетворяющих техническим требованиям по твердости, ниже, чем для полных, следовательно, их среднее значение является более надежной характеристикой совокупности. Произведена сравнительная оценка затрачиваемой электроэнергии на обработку единичной цилиндрической поверхности рассматриваемых изделий. Установлено, что при изменении твердости обрабатываемых заготовок в пределах допустимых значений, изменение энергопотребления при обработке единичной поверхности достигает 16%, а в случае выхода за указанный диапазон – 47%.

**Ключевые слова:** энергоемкость, энергопотребление, рассеивание твердости

---

### **Введение**

Создание современных высокоэффективных технологий направлено на повышение основных показателей технологичности конструкции изделия, которые характеризуют трудоемкость, материалоемкость и энергоемкость изделия. Одним из таких показателей является энергоемкость изделия в изготовлении, определяющая необходимые топливно-энергетические затраты.

В связи со значительным удорожанием энергоносителей, задача сокращения энергопотребления без изменения параметров качества готового изделия в настоящее время становится одной из актуальных как в машиностроении в целом, так и в механообработке.

Поскольку указанная задача является многоплановой, подход исследователей к ней представляет собой широкий спектр рассматриваемых вопросов, среди которых как организационно-экономические, так и технологические. В рамках технологического

подхода следует рассматривать различные оптимизационные схемы работы всего технологического комплекса станок – приспособление – инструмент – деталь.

В частности, обобщенная структура ресурсосбережения представлена в [1], где приведены модели расчета показателей как материало- и трудоемкости, так и экономичности энергопотребления. Технологические подходы напротив, предлагают решение локальных задач, как, например, сравнительный анализ металлорежущих станков, рассмотренный в [2].

Непосредственно твердость заготовок, как параметр, влияющий на динамические характеристики процессов резания и, как следствие, на энергоемкость, указывается во многих литературных источниках. Степень ее влияния отражается различными способами: либо введением в основные расчетные формулы [3,4], либо в виде поправочных коэффициентов [5], либо опосредовано через марку обрабатываемого материала [6]. Но во всех случаях это величина постоянная, рассмотренная без рассеивания.

Необходимость учета рассеивания микротвердости материалов показана в [7], но решенная задача ориентирована на оценку износостойкости режущих инструментов.

Данная работа относится к области мероприятий, регулирующих энергопотребление непосредственно при резании металлов путем сокращения силы резания за счет подбора параметров обработки. На основании анализа литературных источников и проведенных экспериментальных исследований ранее установлен ряд параметров, чье влияние на результирующую силу резания в рекомендуемых технологических диапазонах превышает 10% [8,9]. К ним относятся подача  $S_0$ , глубина резания  $t$ , скорость резания  $v$ , передний угол  $\gamma$ , величина износа по задней поверхности  $h_z$  и твердость заготовки. Все указанные параметры являются независимыми, но некоторые из них могут удерживаться на постоянном уровне при механической обработке, а некоторые имеют рассеивание, как результат случайных воздействий в технологических и физических процессах.

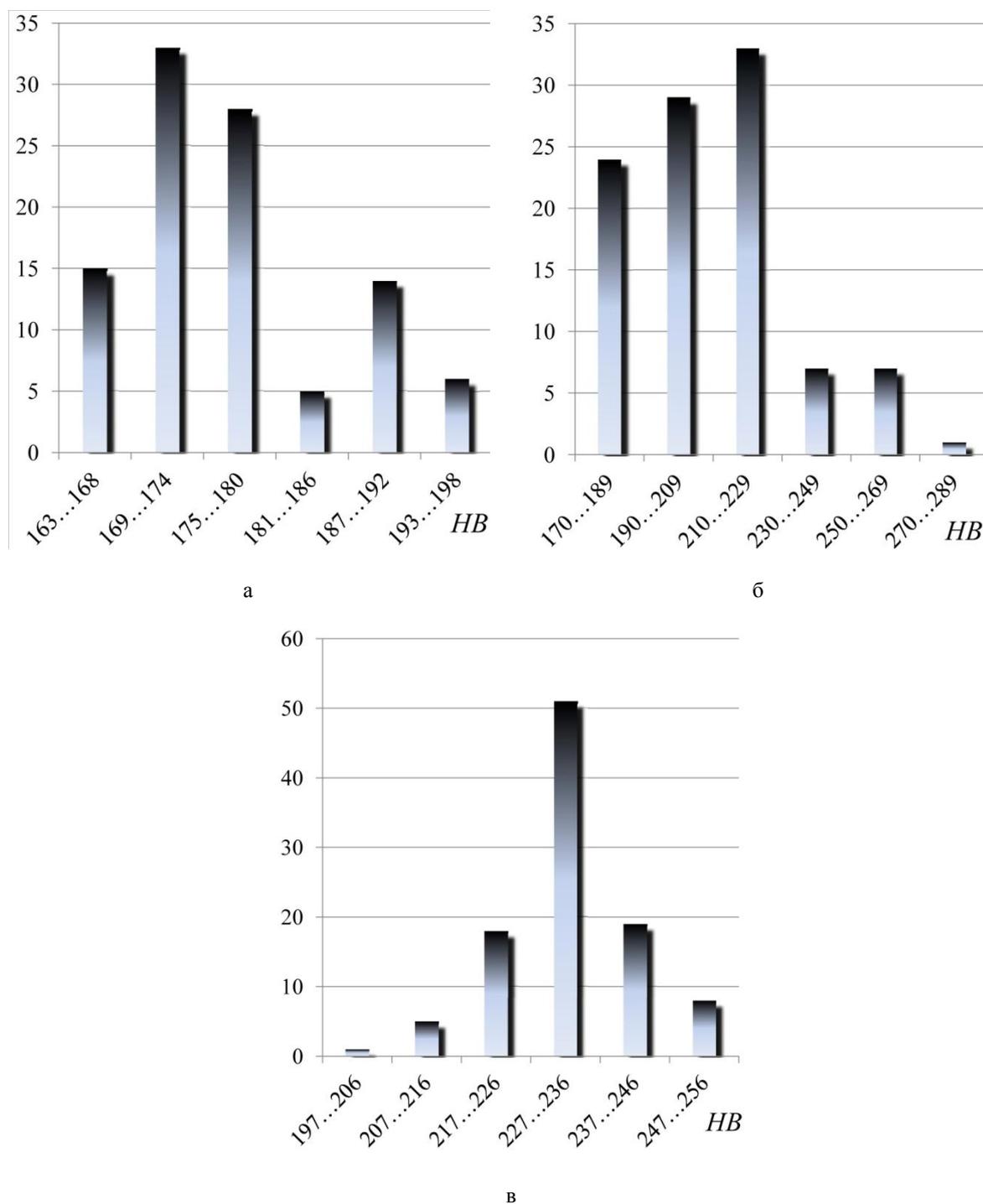
Целью представленной работы является оценка рассеивания твердости поковок, предназначенных для дальнейшей механической обработки, и анализ влияния этого рассеивания на результирующее энергопотребление при резании.

## 1. Экспериментальные и статистические исследования

Рассеивание значений твердости исследовалось на трех видах деталей, изготавливаемых на автомобильном заводе из стали 45: ступица шкива вентилятора, вилка скользящая кардана и фланец вторичного вала коробки передач. Согласно техническим требованиям, установленным на чертеже заготовки, диапазон твердости должен был быть соответственно: на ступице шкива вентилятора 167...190 НВ; на вилке скользящей кардана 200...245 НВ; на фланце вторичного вала коробки передач 200...245 НВ.

Величина выборки по каждой детали составляла  $n = 100$  штук. Измерение твердости проводилось на твердомере ТБ ГОСТ 23677-79. Результаты измерения твердости представлены в виде гистограмм на рисунке 1.

Анализ результатов измерений показал, что у фланца вторичного вала коробки передач в требуемый диапазон вошло 93% всех деталей, у ступицы шкива вентилятора – 82%, а у вилки скользящей кардана лишь 46%.



**Рисунок 1.** Гистограммы распределения твердости на ступице шкива вентилятора (а), вилке скользящей кардана (б) и фланце вторичного вала коробки передач (в)

Для дальнейшей обработки данных полученные выборки были проверены на их принадлежность нормальному закону распределения по критериям среднего абсолютного отклонения, границ, Пирсона, Колмогорова-Смирнова и асимметрии и эксцесса [10]. Во всех выборках нулевая гипотеза о нормальности распределения не отклоняется по большому числу критериев. Из чего сделан вывод, что все выборки имеют нормальный закон распределения, факторы, влияющие на них, случайны, а статистические характеристики, представленные в таблице 1, могут быть использованы в расчетах.

**Таблица 1.** Статистические характеристики распределения твердости поковок и энергоемкости обработки их цилиндрических поверхностей

Изделие	Ступица шкива вентилятора	Вилка скользящая кардана	Фланец вторичного вала коробки передач
<b>Статистические характеристики распределения твердости поковок</b>			
Среднее значение твердости, $HB_{cp}$	176,505	211,564	230,569
Дисперсия, $\sigma_{HB}^2$	81,812	589,168	133,574
Среднеквадратическое отклонение, $\sigma_{HB}$	9,045	24,273	11,557
Коэффициент вариации, $V_{HB}$	0,051	0,115	0,050
<b>Размеры обрабатываемой цилиндрической поверхности</b>			
Диаметр, мм	85	68	60
Длина, мм	15	72	42
<b>Статистические характеристики распределения энергоемкости обработки цилиндрических поверхностей</b>			
Среднее значение энергоемкости, $E_{cp}$	0,0033	0,0148	0,0083
Дисперсия, $\sigma_E^2$	$1,564 \cdot 10^{-8}$	$1,610 \cdot 10^{-6}$	$9,752 \cdot 10^{-8}$
Среднеквадратическое отклонение, $\sigma_E$	0,0001	0,0013	0,0003
Коэффициент вариации, $V_E$	0,038	0,086	0,038

## 2. Расчет энергопотребления при токарной обработке наружных цилиндрических поверхностей рассматриваемых деталей

Для сравнительной оценки затрат электроэнергии произведены расчеты для обработки наружных цилиндрических поверхностей рассматриваемых деталей, конструктивные размеры которых приведены в таблице 1. В условиях расчета приняты параметры режима обработки предприятия: частота вращения шпинделя  $n = 300$  мм/об, глубина резания  $t = 1,5$  мм, подача на оборот  $S_0 = 0,3$  мм/об; резец токарный со сменной многогранной пластиной T15K6. Расчет тангенциальной составляющей силы резания  $P_z$ ,

Н, выполнен согласно зависимости, представленной в [3], эффективная мощность резания  $N_3$ , кВт, определялась по формуле

$$N_3 = \frac{P_z \cdot v}{60000},$$

где  $v$  – скорость резания, м/мин, а энергоемкость обработки одной цилиндрической поверхности  $E$ , кВт·ч, на один проход по формуле

$$E = \frac{N_3 \cdot t_0}{60}$$

где  $t_0$  – основное технологическое время, мин.

В результате преобразований установлено, что энергоемкость механической обработки является функцией случайной переменной, и для анализа полученных выборок проведены проверки на их принадлежность нормальному закону распределения и получены статистические характеристики, представленные в таблице 1.

Аналогичный статистический анализ проведен для выборок, в которые вошли поковки, чья твердость входит в допустимый диапазон значений, указанных на чертеже. Величины таких выборок составили соответственно: ступица шкива вентилятора - 82 штуки; вилка скользящая кардана – 46 штук; фланец вторичного вала коробки передач – 93 штуки. Результаты сведены в таблицу 2.

Анализ характеристик, представленных в таблицах 1 и 2, указывает на то, что все совокупности являются однородными. Уменьшение коэффициента вариации для выборок, удовлетворяющих техническим требованиям, позволяет утверждать, что их среднее значение является более надежной характеристикой совокупности.

Таким образом установлено, что для обеспечения надежного прогноза энергоемкости обработки при проектировании технологических процессов следует максимально сокращать допустимый диапазон твердости заготовок.

Для сравнительной оценки затрачиваемой электроэнергии на единичную цилиндрическую поверхность рассматриваемых изделий проведены расчеты для граничных значений твердости поковок. Результаты расчетов сведены в таблицу 3. В качестве оценочного критерия рассматривается относительное изменение затрачиваемой электроэнергии при минимальном и максимальном уровнях значения твердости:

$$\delta = \frac{(E_{\max} - E_{\min})}{E_{\min}} \cdot 100\%$$

**Таблица 2.** Статистические характеристики распределения твердости поковок и энергоемкости обработки их цилиндрических поверхностей для выборок, удовлетворяющих техническим требованиям

Изделие	Ступица шкива вентилятора	Вилка скользящая кардана	Фланец вторичного вала коробки передач
<b>Статистические характеристики распределения твердости поковок</b>			
Среднее значение твердости, $HV_{cp}$	176,793	224,739	228,903
Дисперсия, $\sigma^2_{HV}$	39,821	110,819	82,871
Среднеквадратическое отклонение, $\sigma_{HV}$	6,310	10,527	9,103
Коэффициент вариации, $V_{HV}$	0,036	0,047	0,040
<b>Статистические характеристики распределения энергоемкости обработки цилиндрических поверхностей</b>			
Среднее значение энергоемкости, $E_{cp}$	0,0033	0,0155	0,0083
Дисперсия, $\sigma^2_E$	$7,633 \cdot 10^{-9}$	$2,983 \cdot 10^{-7}$	$6,099 \cdot 10^{-8}$
Среднеквадратическое отклонение, $\sigma_E$	$8,737 \cdot 10^{-5}$	$5,462 \cdot 10^{-4}$	$2,470 \cdot 10^{-4}$
Коэффициент вариации, $V_E$	0,027	0,035	0,030

**Таблица 3.** Результаты расчетов затрачиваемой электроэнергии при различных значениях твердости заготовки

Изделие	Допустимый диапазон твердости HB		Изменение затрачиваемой электроэнергии $\delta$ , %	Реальный диапазон твердости HB		Изменение затрачиваемой электроэнергии $\delta$ , %
	min	max		min	max	
Ступица шкива вентилятора	167	190	10	163	197	15
Вилка скользящая кардана	200	245	16	170	285	47
Фланец вторичного вала коробки передач	200	245	16	197	255	21

Как наглядно представлено в таблице 3, даже в рамках рекомендуемого диапазона твердости разница в потребляемой электроэнергии достигает 16%. А изменение энергозатрат при обработке деталей с минимальным и максимальным реально измеренными значениями твердости достигает 47%.

## Выводы

1. Твердость поковок одной партии подвержена рассеиванию, ее распределение подчиняется нормальному закону.

2. Энергоемкость механической обработки из-за рассеивания значений твердости заготовок является функцией случайной переменной  $HV$  и сама является случайной величиной. При изменении твердости обрабатываемых заготовок в пределах допустимых значений, изменение энергоемкости обработки достигает 16%, а в случае выхода за указанный диапазон – 47%.

3. Значение коэффициента вариации для выборок, удовлетворяющих техническим требованиям, ниже, чем для полных, следовательно, их среднее значение является более надежной характеристикой совокупности.

4. Для обеспечения надежного прогнозирования энергоемкости обработки при проектировании технологических процессов следует максимально сокращать допустимый диапазон твердости заготовок.

## Список литературы

1. Волков Б.Н., Яновский Г.А. Основы ресурсосбережения в машиностроении. Л.: Политехника, 1991. 180 с.
2. Григорьев С.Н., Кузнецов А.П., Волосова М.А., Кориат Х.-Дж. Классификация металлорежущих станков по энергоэффективности // Вестник машиностроения. 2013. № 12. С. 51-55.
3. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 2 / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение. 1985. 496 с.
4. Грановский В.Г., Грудов П.П., Кривоухов В.А., Ларин М.Н., Малкин А.Я. Резание металлов / под ред. В.А. Кривоухова. М.: Машгиз, 1954. 472 с.
5. Режимы резания металлов инструментами из быстрорежущей стали (для одноинструментальной обработки). М.: Машгиз, 1950. 340 с.
6. Барановский Ю.В., Брахман Л.А., Гдалевич А.И., Горецкая З.Д., Донец И.П., Климов А.К., Корчемкин А.Д., Лопухин Ю.А., Мазин Г.С., Малышев В.И. Режимы резания металлов: Справочник. М.: НИИТавторпром, 1995. 456 с.
7. Виноградов Д.В., Кашаева Э.А. Оценка износостойкости быстрорежущих инструментов по параметрам распределения микротвердости // Известия вузов. Машиностроение. 1994. № 1-3. С. 95-101.
8. Древаль А.Е., Малькова Л.Д. Совместное влияние параметров механической обработки на величину составляющих силы резания // Известия ВУЗов. Сер. Машиностроение. 2007. № 8. С. 53-61.
9. Малькова Л.Д., Чихарева М.А. Исследование характеристик токарной обработки на основе получения и анализа многомерных полиномиальных зависимостей // Наука и

образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 8. С. 49-66. DOI:  
[10.7463/0813.0589299](https://doi.org/10.7463/0813.0589299)

10. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул: учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1988. 239 с.

## **A Forging Hardness Dispersion Effect on the Energy Consumption of Machining**

L.D. Mal'kova<sup>1,\*</sup>

[\\*ludmma@yandex.ru](mailto:ludmma@yandex.ru)

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

---

**Keywords:** energy intensity, energy consumption, dispersion of hardness

---

The aim of the work is to evaluate a hardness dispersion of forgings to be further machined, and analyse the impact of this dispersion on the resulting power consumption when cutting.

The paper studies the hardness values of three kinds of parts for automotive manufacturing. Sample of each part was  $n = 100$  pieces. Analysis of measurements showed that 46% - 93% of parts meet requirements for a range defined by the work-piece working drawing. It was found that hardness of one batch of forgings is under dispersion, which distribution is governed by the normal law.

The work provides calculations for machining the external cylindrical surfaces of the considered parts. In the context of calculating are adopted parameters of the enterprise-processing rate. It is found that power consumption of machining because of the dispersion values of the work-piece hardness is a function of the random BH variable and it itself is a random variable. Two types of samples are considered, namely: the full sample and that of the values that meet requirements for hardness. The coefficient of variation for samples that meet the technical requirements for hardness is lower than for the full samples, so their average value is more reliable characteristic of a set. It was also found that to ensure a reliable prediction of power consumption in designing the manufacturing processes it is necessary to reduce a tolerance range of work-piece hardness to the limit.

The work gives a comparative evaluation of electric power consumption per unit cylindrical surface of the parts under consideration. A relative change in the electric power consumed at the minimum and maximum levels of the hardness value was introduced as an evaluation criterion. It is found that with changing hardness of machined work-pieces within the tolerance, the change in power consumption in machining the unit surface reaches 16% while in the case its being out of the specified range it does 47%.

## References

1. Volkov B.N., Yanovskii G.A. *Osnovy resursosberezheniya v mashinostroenii* [Basics of resources saving in mechanical engineering]. Leningrad, Politekhnik Publ., 1991. 180 p. (in Russian).
2. Grigor'ev S.N., Kuznetsov A.P., Volosova M.A., Koriath H.J. Classification of metal-cutting machines by energy efficiency. *Vestnik mashinostroyeniya*, 2013, no. 12, pp. 51-55. (English version of journal: *Russian Engineering Research*, 2014, vol. 34, no. 3, pp. 136-141. DOI: [10.3103/S1068798X14030058](https://doi.org/10.3103/S1068798X14030058) ).
3. Kosilova A.G., Meshcheryakov R.K., eds. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroyitelya. V 2 t. T. 2* [Handbook of technologist- mechanical engineer. In 2 vols. Vol. 2]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1985. 496 p. (in Russian).
4. Granovskii V.G., Grudov P.P., Krivoukhov V.A., Larin M.N., Malkin A.Ya. *Rezaniye metallov* [Metal Cutting]. Moscow, Mashgiz Publ., 1954. 472 p. (in Russian).
5. *Rezhimy rezaniya metallov instrumentami iz bystrorezhushchei stali (dlya odnoinstrumental'noi obrabotki)* [Modes of metal cutting by tools of high speed steel (for single tooling)]. Moscow, Mashgiz Publ., 1950. 340 p. (in Russian).
6. Baranovskii Yu.V., Brakhman L.A., Gdalevich A.I., Goretskaya Z.D., Donets I.P., Klimov A.K., Korchemkin A.D., Lopukhin Yu.A., Mazin G.S., Malyshev V.I. *Rezhimy rezaniya metallov: Spravochnik* [Metal cutting modes: Handbook]. Moscow, NIITavtorprom Publ., 1995. 456 p. (in Russian).
7. Vinogradov D.V., Kashaeva E.A. Evaluation of wear resistance of high-speed tools according to the parameters of distribution of microhardness. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroyeniye = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 1994, no. 1-3, pp. 95-101. (in Russian).
8. Dreval' A.E., Mal'kova L.D. Mutual influence of parameters of machining on the value of the principal cutting force. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroyeniye = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2007, no. 8, pp. 53-61. (in Russian).
9. Mal'kova L.D., Chihareva M.A. A study of lathing characteristics on the basis of obtaining and analyzing multidimensional polynomial dependences. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2013, no. 8, pp. 49-66. DOI: [10.7463/0813.0589299](https://doi.org/10.7463/0813.0589299) (in Russian).
10. L'vovskiy E.N. *Statisticheskie metody postroyeniya empiricheskikh formul* [Statistical methods of constructing of empirical formulas]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988. 239 p. (in Russian).