

УДК 620.178.16; 621.7.044

# Концепция испытательной машины для локального определения прочности материалов методом сверления

**С.Ш. Рехвиашвили**

Институт прикладной математики и автоматизации — филиал ФГБНУ «Федеральный научный центр «Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук»

## Concept of a testing machine for local material strength determination using the drilling method

**S.Sh. Rekhviashvili**

Institute of Applied Mathematics and Automation, Branch of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences

Предложена конструкция специализированной испытательной машины, предназначенной для локальной оценки прочностных характеристик металлических и композиционных материалов методом контролируемого сверления. Описаны принципы работы установки, включающей в себя систему регистрации осевого усилия, крутящего момента и температурных полей в зоне резания. Рассмотрены способы обработки данных, позволяющие определять удельную энергию разрушения, прочность на срез и диссипативные характеристики на основе анализа кинематических и силовых параметров процесса сверления. Разработана имитационная модель сверления, и приведены результаты численного эксперимента в программе SimInTech, подтверждающие работоспособность концепции. Отмечены преимущества предлагаемого метода перед традиционными способами разрушающего контроля, в том числе возможность минимизации зоны повреждения материала и автоматизации измерений. Разработанную концепцию можно использовать при создании как стационарных лабораторных комплексов, так и мобильных устройств для оперативного мониторинга состояния конструкционных материалов в промышленных условиях.

**EDN:** FOUFQV, <https://elibrary/foufqv>**Ключевые слова:** испытательная машина, метод сверления, нагрев при сверлении, имитационная модель, тепловой баланс, численный эксперимент

The article proposes a design for a specialized testing machine intended for the local evaluation of strength characteristics of metallic and composite materials using the controlled drilling method. The working principles of the setup are examined, including the systems for recording axial force, torque, and temperature fields in the cutting zone. Special attention is given to data processing techniques that enable the determination of specific fracture energy, shear strength, and dissipative properties based on the analysis of kinematic and force parameters of the drilling process. A mathematical model of drilling has been developed, and the results of a numerical simulation in SimInTech software are presented, confirming the feasibility of the concept. The advantages of the proposed method over traditional destructive testing techniques are discussed, including the ability to minimize material damage zones and automate measurements. The developed concept can be used to create both stationary laboratory setups and portable devices for real-time monitoring of structural materials in industrial environments.

EDN: FOUFQV, <https://elibrary/foufqv>

**Keywords:** testing machine, drilling method, heating during drilling, simulation model, thermal balance, numerical simulation

Современные испытательные машины на прочность являются основным инструментом исследования эксплуатационных характеристик материалов, конструкций и изделий в различных отраслях промышленности. Их применение охватывает авиационно-космическую инженерию, автомобилестроение, строительство, медицину и другие сферы, где критически важны точные данные о механических свойствах материалов. В условиях ужесточения международных стандартов качества и роста требований к долговечности изделий разработка и совершенствование испытательного оборудования становятся особенно актуальными.

На сегодняшний день испытательные машины позволяют проводить комплексные исследования статических, динамических и циклических нагрузок, включая растяжение, сжатие, изгиб, кручение и усталостные испытания. Ведущие производители, такие как Instron, MTS Systems, ZwickRoell, Shimadzu и Tinius Olsen, предлагают оборудование с высокой точностью измерений, широким диапазоном нагрузок и возможностью интеграции с современными системами компьютерного управления. Современные машины оснащены специализированным программным обеспечением, которое обеспечивает автоматизацию испытаний, сбор и обработку данных, а также применение методов машинного обучения для прогнозирования поведения материалов. Это позволяет значительно сократить время тестирования, повысить точность результатов и минимизировать влияние человеческого фактора.

Разработка новых материалов, таких как композиты, высокопрочные сплавы и полимеры, требует соответствующего развития методов их испытаний. Испытательные машины нового поколения способны моделировать экстремальные условия эксплуатации, включая высокие и низкие температуры, агрессивные среды и комбинированные нагрузки. Это особенно важно для аэрокосмической и оборонной промышленности, где отказ материала может привести к катастрофическим последствиям. Кроме того, внедрение технологий Индустрии 4.0 (Industry 4.0) и Интернета вещей (IoT) открывает новые возможности для

удаленного мониторинга и управления испытательными процессами, что повышает эффективность производственных циклов и контроль качества на всех этапах жизненного цикла изделия.

Совершенствование испытательных машин на прочность остается важным направлением научно-технического прогресса, обеспечивающим инновационное развитие материаловедения и машиностроения.

Цель исследования — разработка физических основ методики и обоснование концепции нового прибора для исследования прочностных характеристик материалов на основе сверления с контролируемыми параметрами.

В отличие от традиционных разрушающих методов контроля, основанных на растяжении, сжатии и изгибе, новый прибор позволяет локально оценивать сопротивление материала удалению вещества, определять удельную работу разрушения по таким параметрам сверления, как сила подачи, крутящий момент, геометрические параметры отверстия, а также исследовать прочностные свойства хрупких, тонких и композитных материалов, где классические испытания затруднены или невозможны.

Прибор реализует режим кратковременного сверления с постоянными скоростью резания и частотой вращения, что минимизирует тепловые эффекты и позволяет приближенно оценить механическую составляющую разрушения. Измерение глубины отверстия, температуры, усилий и моментов в реальном времени дает возможность построения энергетических характеристик, коррелирующих с прочностью на сдвиг, трещиностойкостью и удельной поверхностной энергией материала.

**Теоретическая модель.** При механической обработке резанием, особенно в процессе сверления, материал подвергается локальному разрушению, сопряженному с затратами механической энергии и образованием теплоты [1–3]. Измеряя основные параметры сверления, можно количественно охарактеризовать энергетические затраты на удаление материала и связать их с его физико-механическими свойствами.

Это дает возможность использовать процесс сверления не только как технологический метод, но и как диагностический.

Сначала предполагаем, что сверление осуществляется достаточно медленно и с постоянными значениями силы  $F$  и скорости резания  $v$ , крутящего момента  $M$  и угловой скорости  $\omega$ . В эксперименте будем измерять глубину отверстия  $h$ , формируемого за фиксированное время  $t$ . Процесс должен проводиться кратковременно и/или медленно для минимизации тепловыделения. Полная работа сверления без учета сил трения и тепловых эффектов складывается из поступательной и вращательной компонент

$$A = \int_0^t F(t')v(t')dt' + \int_0^t M(t')\omega(t')dt', \quad (1)$$

где  $t$  — время;  $t'$  — переменная интегрирования,  $t' \in [0, t]$ .

При изменении параметров сверления в ходе эксперимента работу  $A$  можно рассчитать по формуле (1) на основе экспериментальных данных. Если же параметры остаются постоянными, то из формулы (1) получаем

$$A = (Fv + M\omega)t. \quad (2)$$

Средняя механическая мощность

$$P = A/t = Fv + M\omega. \quad (3)$$

Удаляемый объем материала

$$V = \pi R^2 h_{cyl} + \frac{1}{3} \pi R^2 h_{con} = \pi R^2 \left( h_{cyl} + \frac{1}{3} h_{con} \right), \quad (4)$$

где  $R$  — радиус сверла;  $h_{cyl}$  — высота цилиндрической части отверстия;  $h_{con}$  — высота конической части сверла/отверстия.

Если угол при вершине сверла равен  $2\phi$ , то можно воспользоваться соотношением  $h_{con} = R \operatorname{tg} \phi$ . С учетом этого соотношения из выражений (2) и (4) получаем удельную энергию образования отверстия

$$E_V = \frac{A}{V} = \frac{Fv + M\omega}{\pi R^2 v \left( 1 - \frac{2R \operatorname{tg} \phi}{3h} \right)}, \quad (5)$$

где  $h = h_{cyl} + h_{con}$ .

Формула (5) подразумевает следующее соотношение для постоянной скорости резания:  $v = h/t$ . При достаточно глубоком сверлении выполняется условие  $h \gg R$ , и формула (5) заметно упрощается. Если известны плотность материала и масса стружек, то объем можно рассчитать из этих данных. В рассматриваемой

методике величину  $E_V$  предлагается использовать как основную характеристику испытуемого материала.

Величина  $E_V$ , имеющая размерность энергии на объем (Дж/м<sup>3</sup>), что соответствует давлению (Па), представляет собой энергию, необходимую для разрушения единичного объема материала в условиях сверления, с учетом всех диссипативных потерь. Для сопоставления  $E_V$  с механическими характеристиками материала, например с прочностью на срез  $\tau_c$ , используют калибровку по материалам с известными параметрами. Здесь предполагаем, что зависимость линейная или степенная

$$E_V \approx a \tau_c^n,$$

где  $a$  и  $n$  — эмпирические параметры, определяемые регрессионным анализом по экспериментальным данным для эталонных материалов, в частности для алюминия, стали, меди и т. п.

После калибровки метод позволяет оценивать эквивалентную прочность или эффективность разрушения неизвестных материалов по результатам сверления.

Оценим время процесса, при котором тепловые эффекты можно считать пренебрежимо малыми, для чего воспользуемся уравнением теплового баланса

$$C \frac{dT}{dt} = \Delta P, \quad (6)$$

где  $C$  — эффективная теплоемкость нагреваемой зоны;  $T$  — температура в зоне резания;  $\Delta P$  — фактическая мощность тепловыделения,  $\Delta P = \eta P - P_{heat}$  ( $\eta$  — доля энергии, переходящая в теплоту, обычно равная 0,5...0,9;  $P_{heat}$  — мощность тепловых потерь вследствие конвекции, излучения, отделения стружки, рассасывания теплоты в материале и рабочем инструменте).

Из выражений (3) и (6) получаем

$$t = \frac{C \Delta T}{\eta(Fv + M\omega) - P_{heat}},$$

где  $\Delta T$  — величина повышения температуры при сверлении.

Для сухого сверления доля отводимой теплоты составляет 10...20 %. Так, для типичной углеродистой стали при умеренном сверлении время составляет примерно 1 с для полностью холодного режима. Добавление смазки заметно увеличивает долю отводимой теплоты до 70...90 %.

**Имитационное моделирование.** Работы [4–13] посвящены моделированию процесса сверления. Подобные исследования, как правило, выполняют с применением метода конечных элементов и специализированного программного обеспечения. Высокую физическую информативность экспериментов по сверлению материалов подтверждают, например, результаты работы [14]. Вместе с тем в литературе отсутствуют количественные методы, пригодные для диагностики свойств материалов на основе процесса сверления.

В связи с этим разработана динамическая и согласованная модель, учитывающая как механические процессы (вращательное и поступательное движение), так и тепловой баланс в зоне резания. Модель оперирует с усредненными параметрами, что делает ее вычислительно эффективной для демонстрации основных физических взаимосвязей. Система уравнений движения и теплового баланса имеет следующий вид:

$$m \frac{dv}{dt} = F_0 - F - \mu_F v; \quad (7)$$

$$I \frac{d\omega}{dt} = M_0 - M - \mu_M \omega; \quad (8)$$

$$C \frac{dT}{dt} = \eta P - P_{heat} = \eta (Fv + M\omega + \mu_F v^2 + \mu_M \omega^2) - P_0 \left[ \left( \frac{T}{T_0} \right)^b - 1 \right]; \quad (9)$$

$$v(0) = 0; \quad \omega(0) = 0; \quad T(0) = T_0, \quad (10)$$

где  $m$  — эффективная масса поступательно движущихся элементов (сверла, части механизма подачи);  $F_0$  и  $F$  — сила подачи и осевая сила, которая противодействует поступательному движению сверла;  $\mu_F$  и  $\mu_M$  — коэффициенты вязкого трения подачи и вращения;  $I$  — момент инерции вращающихся элементов (сверла, патрона, части шпинделя);  $M_0$  — крутящий момент двигателя;  $M$  — крутящий момент резания;  $P_0$  и  $b$  — параметры аппроксимации мощности тепловых потерь;  $T_0$  — температура внешней среды.

Далее предполагаем, что силы и моменты являются постоянными величинами, независимыми от времени и температуры. В этом случае решения задач Коши для уравнений (7) и (8) записываются в аналитическом виде. Таким

образом, исходная задача существенно упрощается и принимает вид

$$v(t) = \frac{F_0 - F}{\mu_F} \left( \left[ 1 - e^{-\frac{\mu_F t}{m}} \right] \right); \quad (11)$$

$$\omega(t) = \frac{M_0 - M}{\mu_M} \left( \left[ 1 - e^{-\frac{\mu_M t}{I}} \right] \right); \quad (12)$$

$$T(t) = T_0 + \frac{1}{C} \int_0^t [\eta P(t') - P_{heat}(t')] dt'. \quad (13)$$

Алгоритм имитационного моделирования сводится к численному интегрированию нелинейного дифференциального уравнения (13) с учетом выражений (11) и (12). Для численного эксперимента использована программа динамического моделирования SimInTech [15, 16].

Имитационная модель испытательной машины, основанная на системе уравнений (11)–(13), приведена на рис. 1, а результаты моделирования — зависимости скорости резания  $v$ , угловой скорости  $\omega$  и температуры в зоне резания  $T$  от времени  $t$  — на рис. 2.

Имитационная модель учитывает взаимосвязь механической и тепловой энергии в процессе сверления, позволяя быстро оценить влияние различных параметров на динамику и конечную температуру.

На рис. 1 указаны значения всех входных параметров, заданных для моделирования условного вязкоупругого материала. Изменяя эти параметры, можно оценить скорость выхода сверла в стационарный режим и достигаемую при этом температуру. Коэффициенты резания и трения напрямую отражают реологические свойства материала, а также эффективность возможной смазки рабочей зоны: их увеличение приводит к более интенсивному тепловыделению и, как следствие, к повышению температуры. Инерционные параметры (момент инерции и масса) влияют на динамику разгона, а параметры теплового баланса (эффективная масса, теплоемкость, параметры аппроксимации) определяют, насколько быстро система способна поглощать и рассеивать теплоту. Минимизация трения при сверлении позволяет выделить прочностной вклад.

Модели (7)–(10) и (11)–(13) содержат коэффициенты вязкого трения подачи и вращения. Эти коэффициенты не являются общепринятыми и отсутствуют в справочной литературе, поэтому их значения подбирают эмпирически в процессе вычислительного эксперимента так,

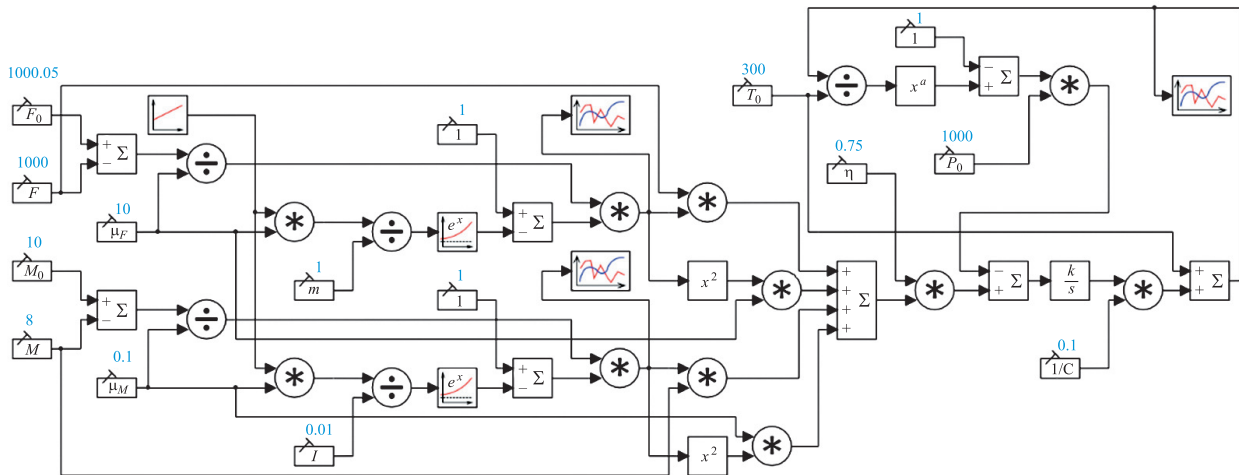


Рис. 1. Имитационная модель испытательной машины, основанная на системе уравнений (11)–(13)

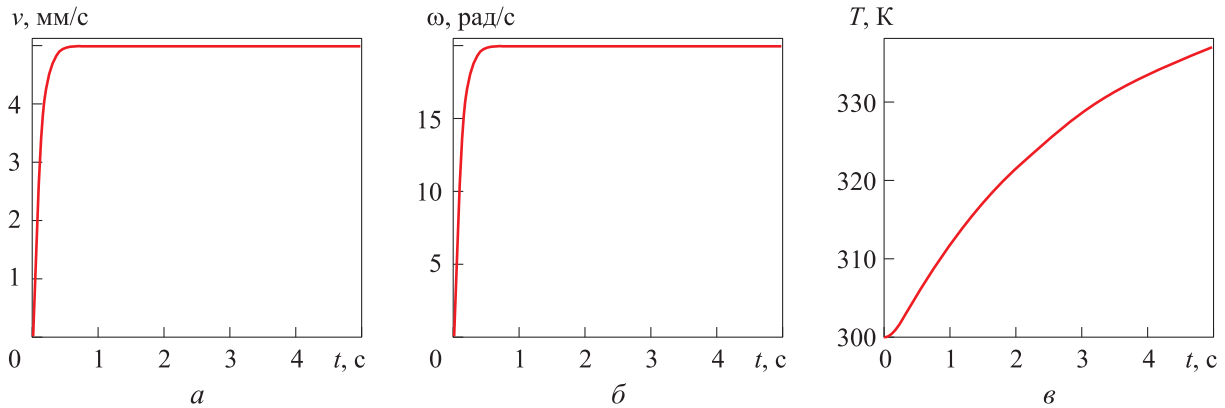


Рис. 2. Зависимости скорости резания  $v$  (а), угловой скорости  $\omega$  (б) и температуры в зоне резания  $T$  (в) от времени  $t$

чтобы обеспечивалось наилучшее согласие с экспериментом. Из общих физических соображений можно лишь заключить, что для большей части материалов должно выполняться условие  $\mu_F \gg \mu_M$ .

Экспериментально измеренная кинетика нагрева при сверлении содержит ценную информацию о физических процессах, происходящих в зоне резания. Кривая нагрева аппроксимирована функцией

$$T(t) = T_0 + (T_{\max} - T_0)e^{-t/t_0}, \quad (14)$$

где  $T_{\max}$  — максимальная температура при  $t \rightarrow \infty$ ;  $t_0$  — характерное время нагрева.

Согласно выражениям (6) и (14), наклон кривой нагрева в начальной точке определяется теплоемкостью и фактической мощностью тепловыделения

$$\left. \frac{dT(t)}{dt} \right|_{t=0} = \frac{T_{\max} - T_0}{t_0} \approx \frac{\Delta P}{C}.$$

Если эксперимент показывает быстрый нагрев до 600 К с выходом на плато, то основной вклад вносит именно трение. При медленном нагреве с линейным ростом, по-видимому, доминирует деформация материала. Резкие изгибы на кривой свидетельствуют о фазовых переходах в материале, в частности о плавлении. Если увеличение скорости резания  $v$  снижает температуру  $T_{\max}$ , то стружка эффективно уносит теплоту; слабая зависимость  $T_{\max}$  от скорости резания указывает на преобладание радиационного/конвективного теплообмена.

Отметим также, что измерение нагрева может играть конструктивную роль при изучении кривых Штрибека для испытуемых материалов [17]. Наиболее общая модель (7)–(10) при этом остается в силе.

**Конструкция испытательной машины.** Для испытательной машины были отобраны наиболее подходящие элементы, обеспечивающие стабильность процесса и точный контроль па-

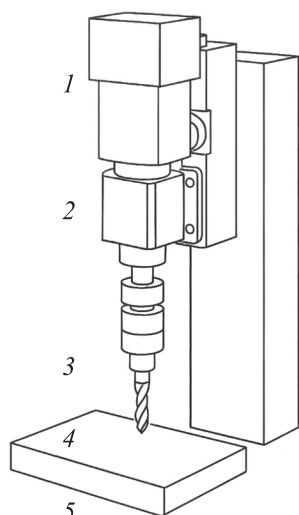


Рис. 3. Схема испытательной машины:  
1 — мотор-редуктор; 2 — датчик крутящего момента;  
3 — система охлаждения и смазки; 4 — испытуемый образец; 5 — термопара/инфракрасный датчик;  
6 — тензодатчик

раметров медленного сверления. Схема испытательной машины приведена на рис. 3.

Испытательная машина должна включать в себя следующие элементы.

**Привод вращения шпинделя.** Для обеспечения высокоточного и стабильного процесса резания в условиях низкой скорости предложено использовать мотор с высоким крутящим моментом и низкой частотой вращения. Предпочтение отдано бесщеточным DC-моторам (например, Maxon EC-i) в комбинации с планетарными редукторами с передаточным числом от 50:1 до 100:1 или серводвигателям типа NEMA-34 с интегрированным редуктором. Такая конфигурация позволяет достичь рабочего диапазона частоты вращения шпинделя  $10 \dots 200 \text{ мин}^{-1}$ , что дает гибкость в выборе оптимальных режимов резания. Плавная и точная регулировка частоты вращения достигается применением ШИМ-драйвера или ПИД-контроллера, что исключает рывки и обеспечивает стабильность угловой скорости.

**Механизм подачи.** Механизм подачи ориентирован на низкую и стабильную скорость резания, для чего применена шариковинтовая пара с малым шагом ( $2 \dots 4 \text{ мм/об}$ ) в сочетании с тем же типом мотор-редуктора, что и для привода шпинделя. При частоте вращения мотора  $10 \text{ мин}^{-1}$  будет обеспечена скорость резания  $0,04 \dots 0,08 \text{ мм/с}$ . Для точной обратной связи в системе подачи использован линейный энкодер с разрешением  $0,1 \text{ мкм}$ , что позволяет поддер-

живать заданную скорость и глубину резания с высокой точностью, минимизируя флуктуации силы резания.

**Система охлаждения и смазки.** Для эффективного отвода теплоты из рабочей зоны и поддержания стабильных характеристик процесса, предусмотрена активная система подачи смазочно-охлаждающей жидкости. Подача осуществляется малым потоком или капельно непосредственно в зону сверления, что позволяет локально снижать трение и отводить теплоту без существенного изменения параметров резания. Дополнительно для пассивного теплоотвода рабочую зону можно оснастить металлическим кожухом с использованием теплопроводящего компаунда, который соединен с внешним радиатором.

**Измерительные узлы.** Для мониторинга и контроля параметров процесса необходимо использовать следующие измерительные узлы. Датчик крутящего момента, встраиваемый в линию вал — редуктор — шпиндель, должен обеспечивать измерение в низкоскоростном диапазоне ( $0 \dots 5 \text{ Н}\cdot\text{м}$  при частоте вращения  $200 \text{ мин}^{-1}$ ) для точной фиксации изменения крутящего момента. Тензодатчик подачи, неподвижно закрепленный в корпусе системы, исключает проскальзывание. Его высокая частота дискретизации (более  $200 \text{ Гц}$ ) позволяет регистрировать даже незначительные изменения усилия при медленной скорости резания. Для контроля температуры процесса предназначена термопара К-типа, размещенная в непосредственной близости от рабочей зоны. Дополнительно для бесконтактного мониторинга температуры стружки и рабочей зоны можно задействовать инфракрасный датчик.

## Выводы

1. Предложена и теоретически обоснована новая методика экспериментального определения прочностных характеристик материалов, основанная на анализе процесса сверления с контролируемыми механическими параметрами.

2. В отличие от традиционных методов разрушения (базирующихся на растяжении, сжатии, изгибе), предложенный подход позволяет локально оценивать сопротивление материала удалению вещества, включая удельную работу разрушения, энергетические характеристики разрушения и сопротивление сдвигу.

3. Разработана концепция новой испытательной машины, реализующей режим кратковременного сверления с постоянными подачей и частотой вращения инструмента, что обеспечивает минимальные тепловые эффекты и высокую повторяемость измерений.

4. Сформулированы и численно реализованы основные уравнения движения и теплового баланса, связывающие контролируемые параметры сверления (силу подачи, момент, геометрические параметры отверстия) с энергетическими характеристиками разрушения материала.

5. Показано, что измерение глубины отверстия, силы подачи, крутящего момента и температуры в реальном времени позволяет оценивать такие параметры материала, как удельная энергия разрушения в объеме, прочность на срез или скалывание, а также характеристики тепловыделения и теплоотвода.

6. Методика особенно перспективна для испытания хрупких, тонких, многослойных и композитных материалов, где классические методы затруднены или неприменимы.

## Литература

- [1] Троицкий Н.Д. *Глубокое сверление*. Ленинград, Машиностроение, 1971. 174 с.
- [2] Бобров В.Ф. *Основы теории резания металлов*. Москва, Машиностроение, 1975. 344 с.
- [3] Кожевников Д.В., Кирсанов С.В. *Резание материалов*. Москва, Машиностроение, 2007. 303 с.
- [4] Горбунов И.В., Ефременков И.В., Леонтьев В.Л. Моделирование процесса сверления с помощью SPH и конечно-элементного методов. *Известия Самарского научного центра РАН*, 2014, т. 16, № 1-5, с. 1346–1351.
- [5] Дударев А.С., Илюшкин М.В., Николаев И.Ф. Моделирование процесса сверления слоистого материала в LS-DYNA. *Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение*, 2020, т. 22, № 2, с. 64–74.
- [6] Tiffe M., Biermann D. Modelling of tool engagement and FEM-simulation of chip formation for drilling processes. *Adv. Mat. Res.*, 2014, vol. 1018, pp. 183–188, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1018.183>
- [7] Sreenivasulu R., SrinivasaRao C. Modelling, simulation and experimental validation of burr size in drilling of aluminium 6061 alloy. *Procedia Manuf.*, 2018, vol. 20, pp. 458–463, doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.067>
- [8] Popova M.S., Kharitonov A.Y., Parfenyuk S.N. Using computer simulation to aid the research of drilling processes. *Resource-Efficient Technologies*, 2019, no. 3, pp. 13–19, doi: <https://doi.org/10.18799/24056529/2019/3/243>
- [9] Anbarasan M., Senthilkumar N., Tamizharasan T. Modelling and simulation of conventional drilling process using DEFORM 3D. *IJMDA*, 2019, vol. 5, no. 2, pp. 9–16.
- [10] Luo H., Fu J., Wu T. et al. Numerical simulation and experimental study on the drilling process of 7075-t6 aerospace aluminum alloy. *Materials*, 2021, vol. 14, no. 3, art. 553, doi: <https://doi.org/10.3390/ma14030553>
- [11] Fast M., Mierka O., Turek S. et al. Mathematical modeling of coolant flow in discontinuous drilling processes with temperature coupling. *PAMM*, 2022, vol. 22, no. 1, art. e202200142, doi: <https://doi.org/10.1002/pamm.202200142>
- [12] Yu R., Li S., Zou Z. et al. Mathematical modeling and experimental study of cutting force for cutting hard and brittle materials in fixed abrasive trepanning drill. *Micromachines*, 2023, vol. 14, no. 6, art. 1270, doi: <https://doi.org/10.3390/mi14061270>
- [13] Shamoto E., Hayasaka T., Lee K. Theoretical modelling and simulation of chip clogging in drilling and experimental verification. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2025, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-025-15602-y>
- [14] Sklenička J., Hnátík J., Fulemová J. et al. Experimental analysis of effect of machined material on cutting forces during drilling. *Materials*, 2024, vol. 17, no. 11, art. 2775, doi: <https://doi.org/10.3390/ma17112775>
- [15] Карташов Б.А., Шабаев Е.А., Козлов О.С. и др. *Среда динамического моделирования технических систем SimInTech*. Москва, ДМК Пресс, 2017. 424 с.
- [16] Хабаров С.П., Шилкина М.Л. *Основы моделирования технических систем. Среда SimInTech*. Санкт-Петербург, Лань, 2021. 120 с.

- [17] Lu X., Khonsari M.M., Gelinck E.G.E. The Stribeck curve: experimental results and theoretical prediction. *J. Tribol.*, 2006, vol. 128, no. 4, pp. 789–794, doi: <http://dx.doi.org/10.1115/1.2345406>

## References

- [1] Troitskiy N.D. *Glubokoe sverlenie* [Deep drilling]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1971. 174 p. (In Russ.).
- [2] Bobrov V.F. *Osnovy teorii rezaniya metallov* [Fundamentals of metal cutting theory]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 344 p. (In Russ.).
- [3] Kozhevnikov D.V., Kirsanov S.V. *Rezanie materialov* [Cutting of metals]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2007. 303 p. (In Russ.).
- [4] Gorbunov I.V., Efremenkov I.V., Leontyev V.L. Simulation of drilling process using sph and finite elements methods. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Izvestia RAS SamSC], 2014, vol. 16, no. 1-5, pp. 1346–1351. (In Russ.).
- [5] Dudarev A.S., Ilyushkin M.V., Nikolaev I.F. Modeling the drilling process of layered material in program LS-DYNA. *Vestnik PNIPU. Mashinostroenie, materialovedenie* [Bulletin PNRPU. Mechanical Engineering, Materials Science], 2020, vol. 22, no. 2, pp. 64–74. (In Russ.).
- [6] Tiffe M., Biermann D. Modelling of tool engagement and FEM-simulation of chip formation for drilling processes. *Adv. Mat. Res.*, 2014, vol. 1018, pp. 183–188, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1018.183>
- [7] Sreenivasulu R., SrinivasaRao C. Modelling, simulation and experimental validation of burr size in drilling of aluminium 6061 alloy. *Procedia Manuf.*, 2018, vol. 20, pp. 458–463, doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.067>
- [8] Popova M.S., Kharitonov A.Y., Parfenyuk S.N. Using computer simulation to aid the reserch of drilling processes. *Resource-Efficient Technologies*, 2019, no. 3, pp. 13–19, doi: <https://doi.org/10.18799/24056529/2019/3/243>
- [9] Anbarasan M., Senthilkumar N., Tamizharasan T. Modelling and simulation of conventional drilling process using DEFORM 3D. *IJMDA*, 2019, vol. 5, no. 2, pp. 9–16.
- [10] Luo H., Fu J., Wu T. et al. Numerical simulation and experimental study on the drilling process of 7075-t6 aerospace aluminum alloy. *Materials*, 2021, vol. 14, no. 3, art. 553, doi: <https://doi.org/10.3390/ma14030553>
- [11] Fast M., Mierka O., Turek S. et al. Mathematical modeling of coolant flow in discontinuous drilling processes with temperature coupling. *PAMM*, 2022, vol. 22, no. 1, art. e202200142, doi: <https://doi.org/10.1002/pamm.202200142>
- [12] Yu R., Li S., Zou Z. et al. Mathematical modeling and experimental study of cutting force for cutting hard and brittle materials in fixed abrasive trepanning drill. *Micromachines*, 2023, vol. 14, no. 6, art. 1270, doi: <https://doi.org/10.3390/mi14061270>
- [13] Shamoto E., Hayasaka T., Lee K. Theoretical modelling and simulation of chip clogging in drilling and experimental verification. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2025, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-025-15602-y>
- [14] Sklenička J., Hnátík J., Fulemová J. et al. Experimental analysis of effect of machined material on cutting forces during drilling. *Materials*, 2024, vol. 17, no. 11, art. 2775, doi: <https://doi.org/10.3390/ma17112775>
- [15] Kartashov B.A., Shabaev E.A., Kozlov O.S. et al. *Sreda dinamicheskogo modelirovaniya tekhnicheskikh sistem SimInTech* [SimInTech dynamic simulation environment for technical systems]. Moscow, DMK Press Publ., 2017. 424 p. (In Russ.).
- [16] Khabarov S.P., Shilkina M.L. *Osnovy modelirovaniya tekhnicheskikh sistem. Sreda SimInTech* [Fundamentals of Modeling Technical Systems. SimInTech Environment]. Sankt-Petersburg, Lan Publ., 2021. 120 p. (In Russ.).
- [17] Lu X., Khonsari M.M., Gelinck E.G.E. The Stribeck curve: experimental results and theoretical prediction. *J. Tribol.*, 2006, vol. 128, no. 4, pp. 789–794, doi: <http://dx.doi.org/10.1115/1.2345406>

## Информация об авторе

**РЕХВИАШВИЛИ Серго Шотович** — доктор физико-математических наук, заведующий отделом Теоретической и математической физики. Институт прикладной математики и автоматизации — филиал ФГБНУ «Федеральный научный центр «Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук» (360000, Нальчик, Российская федерация, ул. Шортанова, д. 89а, e-mail: rsergo@mail.ru).

## Information about the author

**REKHVIASHVILI Sergo Shotovich** — Doctor of Science (Physics and Math), Head of the Department of Theoretical and Mathematical Physics. Institute of Applied Mathematics and Automation, Branch of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (360000, Nalchik, Russian Federation, Shortanova St., 89a, e-mail: rsergo@mail.ru).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Рехвиашвили С.Ш. Концепция испытательной машины для локального определения прочности материалов методом сверления. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 3, с. 79–87.

### Please cite this article in English as:

Rekhviashvili S.Sh. Concept of a testing machine for local material strength determination using the drilling method. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 3, pp. 79–87.



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана  
предлагает читателям учебное пособие**

**«Физические основы материаловедения.  
Курс лекций»**

**Авторы: Ю.А. Курганова, Р.С. Фахуртдинов,  
Л.П. Фомина**

Рассмотрены теоретические основы и прикладные аспекты материаловедения, предусмотренные образовательным стандартом, представлен широкий спектр конструкционных материалов. В конце каждого модуля приведены контрольные вопросы и задания для самоконтроля.

Учебное пособие разработано в соответствии с учебными планами и программой дисциплины «Физические основы материаловедения» МГТУ им. Н.Э. Баумана для студентов бакалавриата, обучающихся по направлению подготовки: 16.03.01 «Техническая физика», а также может представлять интерес для студентов всех специальностей, изучающих дисциплину «Материаловедение».

### По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;  
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>