

## Оптимизация режимов резания при сверлении закаленной стали на основе моделирования в Abaqus/Explicit

*М.В. Кузьмин, М.В. Даниленко*

*Волжский политехнический институт (филиал) ВолгГТУ*

**Аннотация:** в статье исследуется процесс сверления закалённой стали 40 HRC 24...32 с использованием численного моделирования в программном комплексе Abaqus/Explicit. Основное внимание уделено анализу напряжённо-деформированного состояния системы, морфологии стружки и влиянию геометрических параметров сверла на износ инструмента. Показано, что оптимизация режимов резания (скорости подачи и количества оборотов) позволяет снизить эквивалентные напряжения Мизеса до 55% от предела прочности материала, что способствует увеличению стойкости инструмента. Результаты моделирования демонстрируют зависимость распределения напряжений от подачи и скорости резания, а также влияние геометрии сверла на процесс обработки.

**Ключевые слова:** сверление, закалённая сталь, численное моделирование, метод конечных элементов, напряжения Мизеса, стойкость инструмента, оптимизация режимов резания, геометрия сверла.

### Введение

Сверление – ключевая технология в машиностроении, составляющая более 40% операций по удалению материала. Обработка закаленных сталей осложняется их высокой твердостью, низкой теплопроводностью и вибрациями, что ускоряет износ инструмента и снижает точность обработки.

Целью статьи является разработка имитационной модели процесса сверления закалённой стали 40 HRC 24...32 для анализа напряжённо-деформированного состояния, оптимизации режимов резания и повышения стойкости режущего инструмента на основе численного моделирования в Abaqus/Explicit.

Научная новизна заключается в комплексном моделировании механических полей в зоне резания с учетом условий сверления закаленной стали, с анализом воздействия на инструмент и оптимизации параметров сверления.

### Анализ исследований

Экспериментальные методы, несмотря на точность, требуют значительных затрат. Альтернативой служит численное моделирование, прогнозирующее усилия резания, износ инструмента, распределение температуры и напряжений.

Наноструктурированные покрытия (AlTiSiN/CrVN/ZrN) увеличивают стойкость сверл на 70% за счет снижения адгезионного и абразивного износа. Эксперименты с PVD-покрытиями подтвердили их эффективность в снижении температуры резания и шероховатости поверхности [1,2].

Геометрия сверла (угол при вершине, наклон канавки) влияет на распределение нагрузок, но ее эффект менее значим, чем выбор режимов резания. Например, угол при вершине  $135^\circ$  и низкие скорости резания (110 мм/мин) увеличивают срок службы инструмента [3,4].

Моделирование методом конечных элементов (FEA) позволяет прогнозировать нагрузки и износ инструмента без дорогостоящих экспериментов. В работах [5,6] показано, что осевая сила и деформация зависят от скорости подачи, а оптимизация геометрии инструмента снижает усилие резания в 3 раза.

Для анализа топографии поверхности и шероховатости применяются методы, основанные на геометрических факторах и динамике обработки [7,8]. Например, моделирование микрофрезерования [9] учитывает минимальную толщину стружки ( $0,25 \cdot r_e$ ), что согласуется с экспериментальными данными.

Исследования адгезионного износа [10,11] демонстрируют, что объем износа зависит от нагрузки, расстояния скольжения и твердости материала. Модель Usui позволяет прогнозировать износ на основе температуры и скорости резания [12].

В предыдущих моделях моделирование процесса сверления с идеальной морфологией стружки редко осуществлялось с помощью универсальных пакетов. Желательно создать моделирование, включающее сложную геометрию сверла, для определения деформации материала и образования стружки.

### **Принцип моделирования процесса сверления**

Являясь началом серии исследований по технологии сверления небольших отверстий в типичных труднообрабатываемых материалах (сталь 40 HRC32), эта статья будет направлена на разработку эффективной имитационной модели процесса сверления небольших отверстий, используя сталь 40 HRC32 в качестве рабочего материала.

В этом исследовании изучаются не только распределение напряжений и деформаций, но и морфология стружки и влияние кромки сверла как с помощью моделирования, так и экспериментов.

В работе представлена 3D-модель сверления, реализованная в Abaqus/Explicit на основе лагранжевого подхода. Геометрия инструмента точно соответствует параметрам экспериментальных сверл. Модель учитывает динамическое взаимодействие инструмента с заготовкой и процесс образования стружки, реализованный через алгоритм удаления элементов.

В качестве модели разрушения используется модель Johnson-Cook, которая применяется для определения деформации материала.

Для проведения исследования в системе Abaqus по геометрическим данным была построена твердотельная модель режущего инструмента диаметром 6,1 мм в программе Компас-3D. Учитывались следующие параметры: диаметр и сверла, угол при вершине, уклон винтовой канавки и толщина поперечной кромки. Далее 3D-модель инструмента импортировали

---

в пакет Abaqus. Затем создали конечно-элементную модель инструмента и заготовки, представлено на рисунке 1. Количество элементов заготовки – 132800, сверла – 3478.

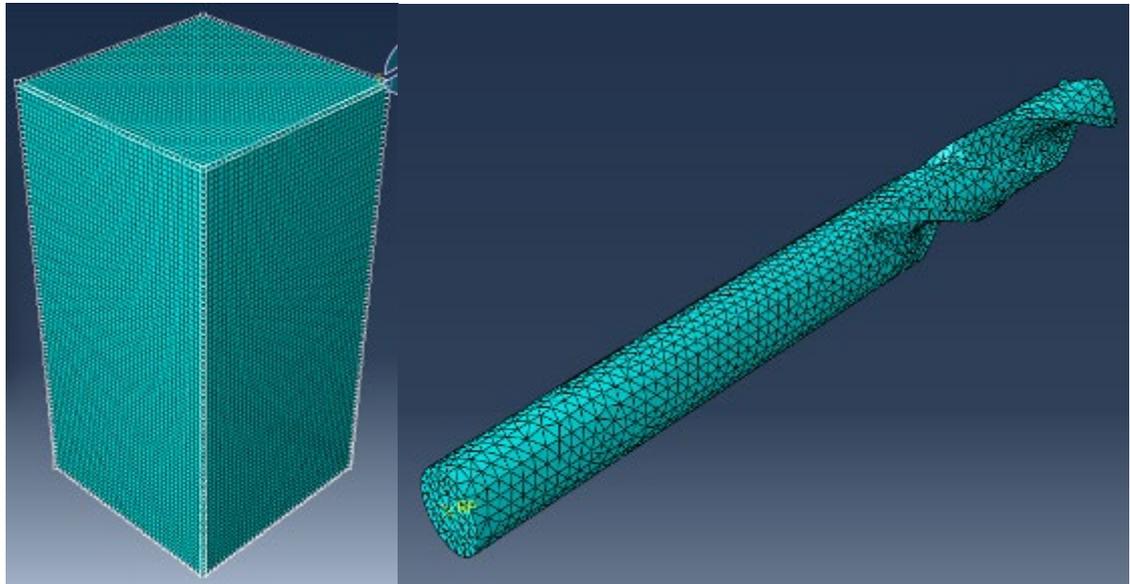


Рис. 1. – Сетка заготовки и сверла

Далее задаем контактные взаимодействия, распределение нагрузок и направления движений.

При обработке стали 40 HRC 24...32 твёрдосплавным инструментом напряжения Мизеса демонстрируют зависимость от режимов резания. Для заготовки из этой стали допустимые эквивалентные напряжения составляют 600-720 МПа (75-85% от предела текучести 850 МПа) [13].

Стойкость сверла можно увеличить, анализируя движения напряжений в обрабатываемом материале. По мере износа инструмента характер напряженного состояния меняется: зона пластических деформаций расширяется, а максимальные напряжения Мизеса смещаются от режущей кромки вглубь материала.

Для проведения исследования сверло врезается в заготовку на глубину 36 мм (рис. 2).

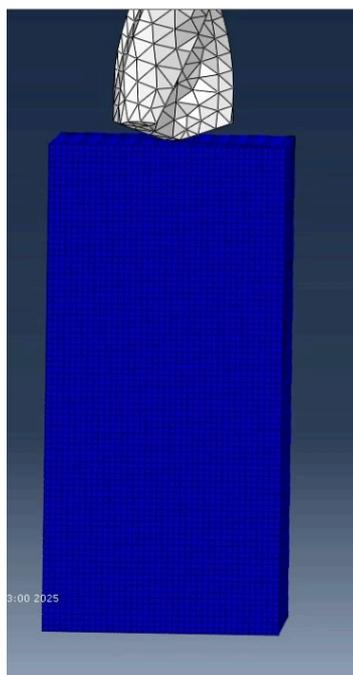


Рис. 2. – Заход сверла в заготовку

### Результаты моделирования

В результате моделирования процесса сверления закалённой стали 40 (HRC32) твёрдосплавным инструментом был проведён конечно-элементный анализ для оценки напряжённо-деформированного состояния системы.

В результате расчётов получено распределение эквивалентных напряжений по фон Мизесу ( $\sigma_e$ ), показано на рисунке 3, которое служит для оценки:

- Зон критического износа (локализация максимальных нагрузок);
- Эффективности режимов резания (оптимизация скорости, подачи, охлаждения).

Наблюдается рост напряжений с увеличением нагрузки по мере увеличения времени процесса, то есть заглубления сверла. На рисунке 4 изображен график напряжения по Мизесу, сформированный в Abaqus.

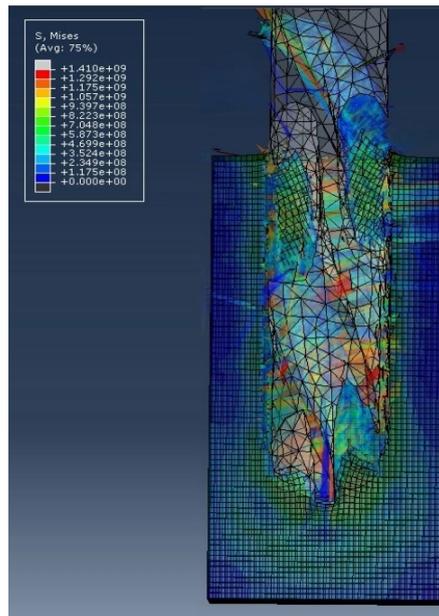


Рис. 3. – Распределение напряжения по Мизесу в материале при заходе сверла ( $s=100$  мм/мин,  $n=1400$  об/мин)

При анализе моделирования было выявлено при подаче 100 мм/мин и количестве оборотов шпинделя 1400 об/мин критическое напряжение превышает  $\sigma_c = 800$  МПа, что составляет 94% от предела прочности материала заготовки. Это происходит из-за насыщения стружкообразования и увеличение трения на боковых поверхностях сверла.

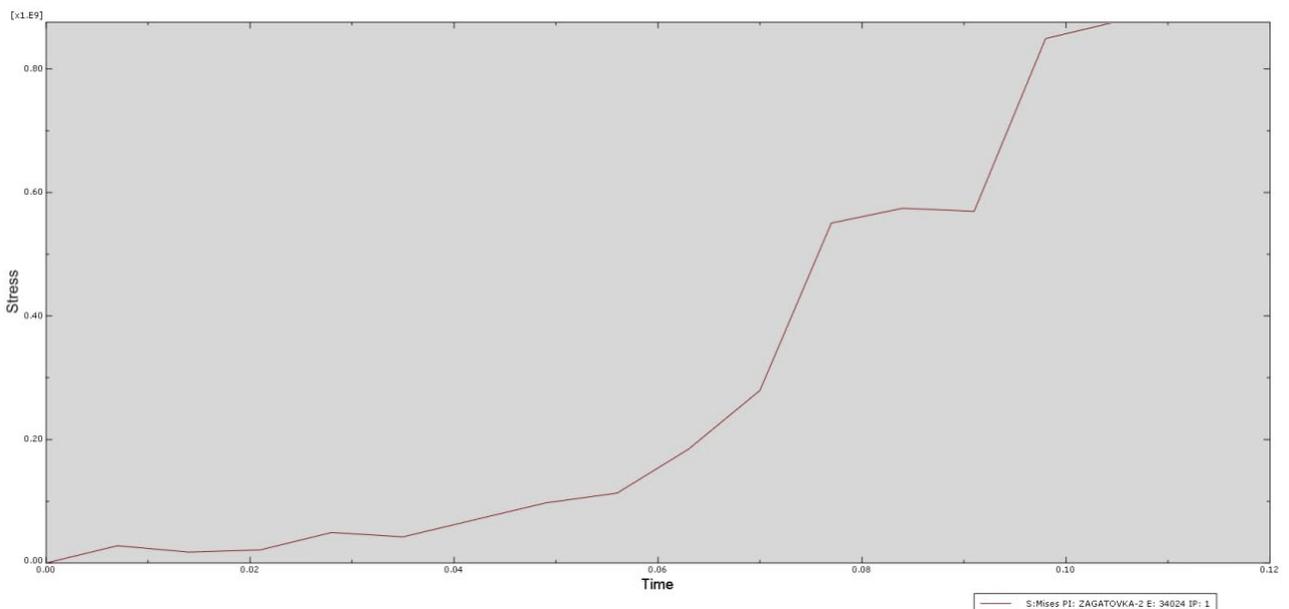


Рис. 4. – Зависимость напряжения от времени при подаче 100 мм/мин

Недостаточная подача при сверлении увеличивает деформацию материала в зоне резания, что приводит к росту напряжений Мизеса. Оптимальная подача снижает напряжения, улучшая процесс резания и стойкость сверла.

Если увеличить подачу до 200 мм/мин (количество оборотов шпинделя 2000 об/мин:  $\sigma_e \approx 450$  МПа (55% от предела прочности), рис. 5.

Так как напряжения в обрабатываемом материале составляют 55% от предела прочности ( $\sigma_u$ ), это указывает на умеренную нагрузку на сверло, что соответствует оптимальному режиму резания и эффективной стойкости инструмента.

Проведенное исследование подтвердило возможность значительного повышения эффективности процесса сверления закаленных сталей за счет оптимизации режимов резания и применения компьютерного моделирования.

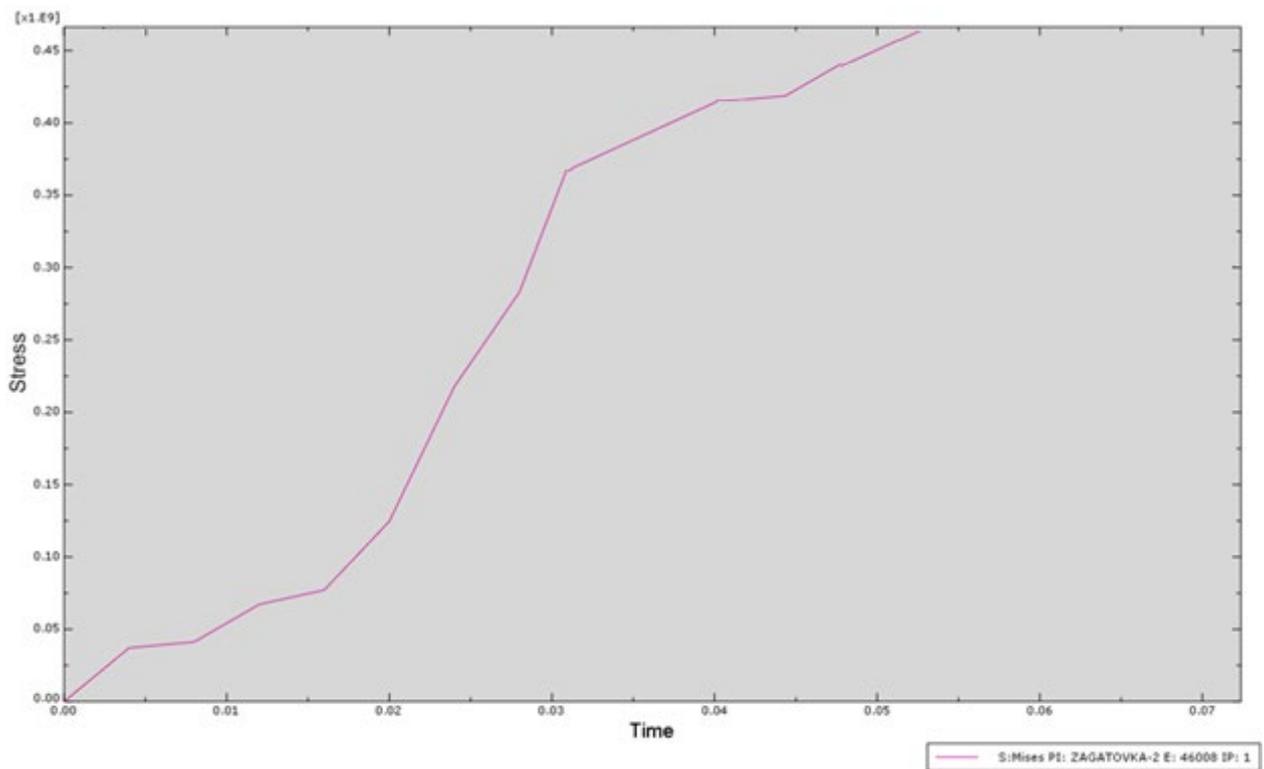


Рис. 5. – Зависимость напряжения от времени при подаче 200 мм/мин

### Заключение

Разработанная 3D-модель сверления в Abaqus/Explicit с использованием модели Джонсона-Кука продемонстрировала возможность прогнозирования напряженно-деформированного состояния при обработке закаленной стали 40 HRC 24...32. Установленные оптимальные параметры резания обеспечивают значительное снижение рабочих напряжений и повышение стойкости инструмента. Полученные результаты открывают новые перспективы для совершенствования технологических процессов механической обработки без необходимости проведения дорогостоящих физических экспериментов. Модель может быть адаптирована для других труднообрабатываемых материалов, что расширяет область ее практического применения в машиностроении.

### Литература (References)

1. Ozbek N.A., Ozbek O., Kara F. Statistical Analysis of the Effect of the Cutting Tool Coating Type on Sustainable Machining Parameters. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2021. Vol. 30. Pp. 123-135.
2. Ozbek N.A. Effects of cryogenic treatment types on the performance of coated tungsten tools in the turning of AISI H11 steel. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9. Pp. 234-245.
3. Mukhtar M., Effendee M., Ibrahim M.H., Syahrir M. Analysis of Solid Carbide Drilling Performance on AISI 316L Austenite Stainless Steel using MQL (Minimum Quantity Lubrication) using Peck Drilling Approach. *Journal of Physics Conference Series*. 2021. Vol. 1874. P. 012034.
4. Sultan A.Z., Sharif S., Kurniawan D. Effect of Machining Parameters on Tool Wear and Hole Quality of AISI 316L Stainless Steel in Conventional Drilling. *Procedia Manufacturing*. 2015. Vol. 2. Pp. 202-207.

5. Yuksel S., Sirin T.B., Ay M., Ucar M. A study on end mill tool geometry parameters for end milling of 316L: finite element analysis and response surface methodology optimization based on resultant cutting force. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2024. Vol. 46. Pp. 345-356.
6. Zhang Y., Huang S., Liu C., Li R. Research on the Characteristics of Deformation and Axial Force Changes During Drilling of Thin-Walled AF1410 High-Strength Steel. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15. P. 3481.
7. Xu J., Yan F., Wan X., Li Y. Surface Topography Model of Ultra-High Strength Steel AF1410 Based on Dynamic Characteristics of Milling System. *Processes*. 2023. Vol. 11. P. 641.
8. Zhu L., Liu C. Recent progress of chatter prediction, detection and suppression in milling. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2020. Vol. 143. P. 106840.
9. Chen W., Xie W., Huo D., Kai Y. A novel 3D surface generation model for micro milling based on homogeneous matrix transformation and dynamic regenerative effect. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2018. Vol. 144. Pp. 146-157.
10. Horvat M., Botak Z. The influence of drill point geometry on tool life. *Tehnički Glasnik*. 2018. Vol. 12. Pp. 1-4.
11. Kato K., Adachi K. *Wear Mechanisms*. 2001. Pp. 73-89.
12. Usui E., Shirakashi T., Kitagawa T. Analytical prediction of cutting tool wear. *Wear*. 1984. Vol. 100. Pp. 129-151.
13. Hazra S. *Journal of materials processing technology*. University of Warwick. 2013. Vol. 213. Pp. 456-468.

**Дата поступления: 4.06.2025**

**Дата публикации: 25.07.2025**