



ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНОЙ ПОРОДЫ PDC РЕЗЦАМИ С РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ АЛМАЗНОГО СЛОЯ

Г.Г. ИШБАЕВ,
д.т.н., профессор,
генеральный директор

Е.А. КОВАЛЕВСКИЙ,
к.т.н., заместитель начальника
отдела породоразрушающего
инструмента
kovalevskii@burinteh.com

А.Г. БАЛУТА,
заместитель генерального
директора—начальник Центра
разработок
balutaag@burinteh.com

А.В. СПЕСИВЦЕВ,
инженер-конструктор отдела
породоразрушающего
инструмента

К.Р. ВАЛЯМОВ,
к.т.н., инженер-конструктор
1 категории отдела
шарошечных долот
valyamovkr@burinteh.com

ООО НПП «БУРИНТЕХ»,
ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный нефтяной
технический университет»

г. Уфа, 450029,
Российская Федерация

e-mail: bit@burinteh.com

**G.G. ISHBAEV,
E.A. KOVALEVSKII,
A.G. BALUTA,
A.V. SPESIVTSEV,
K.R. VALYAMOV**

BURINTEKH Ltd,
Ufa State Petroleum
Technological University
Ufa, Republic of Bashkortostan,
450029, Russian Federation

Наиболее распространенным породоразрушающим инструментом для бурения нефтегазовых скважин являются долота PDC (polycrystalline diamond compact). Подбор оптимальной геометрии резцов PDC является одной из ключевых задач при проектировании режущей структуры долот, позволяющей повысить эффективность разрушения горной породы. В настоящее время производители резцов PDC предлагают резцы с различной формой алмазного слоя (3D-резцы), которые особенно актуальны при бурении в осложненных горно-геологических условиях. В данной статье приведен обзор наиболее распространенных 3D-резцов и принципы их воздействия на горную породу. Показан опыт применения долот ООО НПП «БУРИНТЕХ» с 3D-резцами в условиях Восточной Сибири.

Ключевые слова: резец PDC, долото PDC, разрушение горной породы, удельная механическая энергия, оптимизация конструкции, режущая структура

EFFICIENCY EVALUATION OF ROCK DESTRUCTION BY PDC CUTTERS WITH DIFFERENT GEOMETRIES OF THE DIAMOND LAYER

The most common rock-crushing tool for drilling oil and gas wells are PDC (polycrystalline diamond compact) bits. The selection of the optimal geometry of PDC cutters is one of the key tasks in the design of the bit cutting structure, which allows to increase the efficiency of rock destruction. Currently, manufacturers of PDC cutters offer cutters with different shapes of the diamond layer (3D cutters), which are especially relevant when drilling in complicated geological conditions. This article provides an overview of the most common 3D cutters and the principles of their impact on rock. The trial results of BURINTEKH LLC bits with 3D cutters in the conditions of Eastern Siberia are shown.

Keywords: PDC cutter, PDC bit, rock destruction, mechanical specific energy, design optimization, cutting structure

Разрушение горной породы в процессе бурения скважин – это сложный трудоемкий процесс, требующий значительных технико-технологических ресурсов. Одним из основных факторов, определяющих результативность разрушения породы при работе долотами PDC, является режущая структура, состоящая из поликристаллических алмазных резцов. С целью повышения эффективности разрушения горных пород и увеличения износостойкости резцов PDC производители разрабатывают различные виды геометрии алмазного слоя. Для наиболее эффективного выбора резцов PDC сложной геометрии под конкретные условия проводятся как аналитические исследования их работы, так и экспериментальные исследования путем проведения VTL-тестов в совокупности с проведением опытно-промышленных испытаний.

3D-резцы «Ахе» (рис. 1) позволяют разрушать породу сочетанием резания и дробления за счет своей гребнеобразной формы. Такая геометрия увеличивает сопротивление износу и позволяет увеличить

скорость проходки при идентичных режимных параметрах [1]. Срок жизни таких резцов при испытании на циклическое ударное разрушение на 7,59 % выше по сравнению с обычными цилиндрическими резцами [2]. Резцы с режущей кромкой «гребень» имеют преимущество в эффективности измельчения горной породы, однако при ее разрушении создают тенденцию к возникновению дополнительных отклоняющих сил [3].

Резцы с конической геометрией алмазного слоя (рис. 2) создают более концентрированную нагрузку на горную породу, разрушая ее путем дробления и скалывания. Такая форма резца помогает увеличить механическую скорость проходки при бурении твердых и переслаивающихся горных пород [4]. Благодаря утолщенному алмазному слою конические резцы показывают в 1,85 раза большую устойчивость к изнашиванию по сравнению с обычными резцами, а также большую скорость проходки при равной осевой нагрузке на долото [5, 6]. Комбинированный метод разрушения породы обеспечивает бурение с меньшим

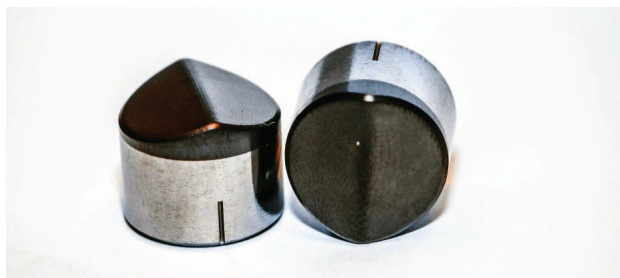


Рис. 1. Резцы PDC «Ахе»



Рис. 2. Конический резец PDC

крутящим моментом с образованием более крупных фрагментов шлама по сравнению со стандартными резцами PDC. Использование резцов с конической геометрией алмазного слоя повышает стабильность бурения, а уменьшение необходимой удельной механической энергии улучшает эффективность разрушения твердых пород [7, 8]. Такие резцы наиболее выгодно устанавливать в качестве второго ряда вооружения долота [9]. Установка конических алмазных резцов за основным рядом вооружения долота PDC также позволяет снизить осевые вибрации [10].

Традиционный цилиндрический резец эффективно перекрывает забой, обеспечивая большую площадь взаимодействия с горной породой. Однако его применение ограничивается глубиной внедрения в горную породу. Конический резец применяется для улучшения эффективности внедрения долота. Это актуально для бурения твердых и переслаивающихся горных пород, когда невозможно довести необходимую осевую нагрузку до долота. Таким образом, эти два типа резцов рекомендуется применять совместно для достижения оптимальной глубины внедрения и площади взаимодействия с породой одновременно [11].

Схожий эффект увеличения точечной нагрузки на породу и снижения необходимой энергии для разрушения создают резцы с усеченными плоскостями 4DXC (рис. 3). Уменьшенная поверхность контакта позволяет улучшить очистку забоя от выбуренной породы, а маленькие размеры частиц шлама облегчают его вынос [12]. Высокое сопротивление износу и способность внедрения делают такие резцы наиболее подходящими для бурения твердых пород [9]. Резец разработан для приложения и поддержания повышенного напряжения на породу с целью эффективного образования и распространения трещин с помощью заостренного алмазного слоя. Такая форма позволяет уменьшить площадь контакта с породой и уменьшить потерю энергии на трение. Скосы на алмазном слое облегчают вынос шлама с забоя и снижают риск образования салника на долоте, особенно при бурении пластичных горных пород. Свыше 80 отработок в Омане показали повышение механической скорости проходки от 27 до 35 % в сравнении с цилиндрическими резцами [13].

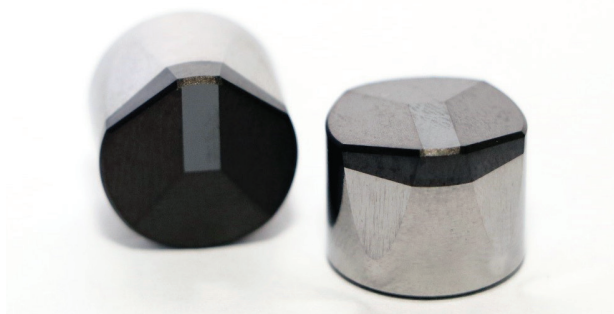


Рис. 3. Резцы 4DXC



Рис. 4. Треугольный резец PDC

Резцы с треугольной формой алмазного слоя (рис. 4) показывают более высокую ударную стойкость по сравнению с обычными цилиндрическими резцами. Такая форма резца подходит для бурения средних и средне-твердых пород из-за высокой эффективности их разрушения [9]. Для разрушения породы данный резец требует меньше удельной механической энергии, чем обычный цилиндрический резец [14]. Благодаря своей треугольной форме резец позволяет разрушать горную породу не только резанием, но и дроблением [15].

3D-резцы активно применяются в долотах ООО НПП «БУРИНТЕХ», в том числе для бурения скважин в сложных горно-геологических условиях. Как правило, буровые долота при работе в подобных условиях подвержены значительному абразивному и ударному воздействию. Твердые и трещиноватые горные породы становятся причиной сколов, сломов, расслоений и других критических повреждений алмазного вооружения долота, что сильно снижает скорость бурения и повышает риск преждевременного отказа.

Анализ бурения в известковистых доломитах Восточной Сибири показывает, что долото БИТ 155,6 ВТ 516 УСВ.33-10, укомплектованное 3D-резцами PDC, успешно пробурило две секции под хвостовик. Первая секция длиной 1132 м в интервале по вертикали 2363-2367 м пробурена со скоростью 20,28 м/ч при плановой скорости 17 м/ч. Вторая секция длиной 993 м в интервале по вертикали 2410-2412 м была пробурена менее чем за 35 часов со средней скоростью 28,5 м/ч с превышением плановой на 67 % (рис. 5).

За два рейса с общей проходкой более 2000 м долото не потеряло своих технических характеристик и осталось пригодно для дальнейшего бурения. В процессе бурения было отмечено снижение общего уровня вибраций.

Таким образом, применение резцов с различной 3D-геометрией алмазного слоя позволяет не только увеличить скорость бурения, но и зачастую снизить вибрации и повысить стойкость породоразрушающего инструмента. Эффект достигается за счет совмещения

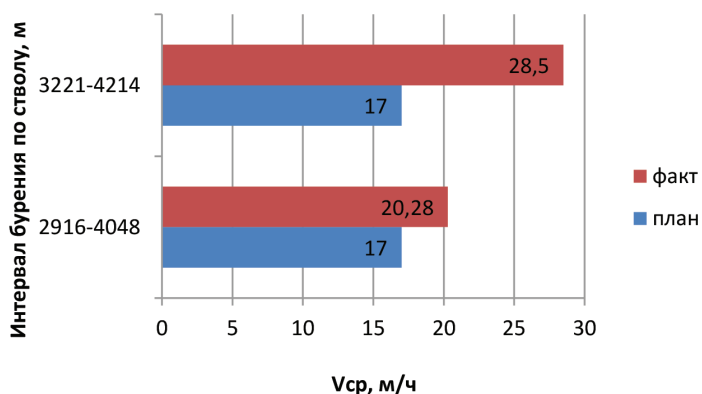


Рис. 5. Сравнение плановой и фактической скоростей бурения известковистых доломитов

разных принципов воздействия на горную породу, перераспределения нагрузки на режущие грани, снижения трения и улучшения очистки забоя от частичек шлама, что снижает энергоёмкость процесса и увеличивает эффективность бурения.

Подбор резцов для конкретных условий бурения должен производиться с учетом аналитических исследований и практического опыта работы для обеспечения наилучшего результата. Важным резервом увеличения эффективности работы режущей структуры PDC долот являются дальнейшие исследования по выбору геометрии алмазного слоя резцов и изучению их влияния на разрушение различных горных пород.

Литература

1. AxeBlade [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://slb.com/products-and-services/innovating-in-oil-and-gas/well-construction/drilling/drill-bits/pdc-bits/axebblade-ridged-diamond-element-bit>.
2. Failure characteristics and service life prediction of polycrystalline diamond compact (PDC) cutter under cyclic impact loading / Yang Li et al. // *Geoenergy Science and Engineering*. – 2023. – Том 231. – P. 212993 c.
3. Pei Ju; Dongzhuagn Tian; Hongjie Tian. Simulation and Experimental Study on Rock Disintegration Characteristics of Special-shaped PDC Cutters // *Journal of Science*. – 2023. – Том 36(1). – С. 414–428.
4. StingBlade [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://slb.com/products-and-services/innovating-in-oil-and-gas/well-construction/drilling/drill-bits/pdc-bits/stingblade-conical-diamond-element-bit>.
5. Study on rock-breaking mechanism of axe-shaped PDC cutter / Fangyuan Shao et al. // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2021. – Том 205. – С. 108922.
6. Majdi Abd Rani, Kong Kai Vern, Azri Hamim Ab Adzis, TVVLN Rao. Effect of size and geometry of polycrystalline diamond cutter (pcd) on wear rate in multilayer formation // *Science International*. – 2017. – Том 29. – С. 529–534.
7. Chao Xiong, Zhongwei Huang, Ruiyue Yang, Mao Sheng, Huaizhong Shi, Xianwei Dai, Xiaoguang Wu, Shikun Zhang. Comparative analysis cutting characteristics of stinger PDC cutter and conventional PDC cutter // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2020. – Том 189. – P. 106792 c.
8. Weiji Liu, Xun Meng, Xiaosong Weng, Xinyu Shen, Xiaohua Zhu. Rock-breaking performance of specially-shaped PDC cutters from a new insight into the damage beneath cutting groove // *Geoenergy Science and Engineering*. – 2023. – Том. 231. – P. 213326 c.
9. Dong Z.; Zhang H.; Li J.; Zhang K.; Ou Y.; Lu Z.; Shi J. A Method for Evaluating the Rock Breaking Efficiency of Cutters and Optimizing the PDC Cutter Profile – A Study of Igneous Rock Formations in Shunbei Oilfield // *Energies*. – 2022. – Том 15. – P. 6686 c.
10. Kong L.; Wang Z.; Wang H.; Cui M.; Liang C.; Kong X.; Wang P. Selection and Optimization Design of PDC Bits Based on FEM

Analysis for Drilling Long Horizontal Sections of Shale Formations. *Processes* 2023, 11, 2807 c.

11. Xianwei Dai, Pengju Chen, Tao Huan, Jiaojiao Liu, Shuang Yan, Zouping Chen. Study on combined cutting and penetration of shaped PDC cutter under bottomhole condition // *Geoenergy Science and Engineering*. – 2023. – Том 229. – P. 212124 c.

12. ION+ 4DX Cutter Technology [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://nov.com/products/ion-4d-cutter-technology>.

13. Reza Rahmani. Rock Customized Shaped Cutters Improve Rock Cutting Efficiency / SPE/IADC Международная Буровая конференция и выставка, 2019.

14. Yijin Zeng, Wenhao He, Zheng Zhang, Huaizhong Shi, Jun Zhou, Shidong Ding, and Guangjun Ma. Rock-breaking performances of innovative triangular-shaped polycrystalline diamond compact cutter // *Review of Scientific Instruments*. – Том 92. – P. 035115 c.

15. Jianxun Liu, Hualin Zheng, Yuchun Kuang, Han Xie, Chao Qin. 3D Numerical Simulation of Rock Cutting of an Innovative Non-Planar Face PDC Cutter and Experimental Verification // *Applied Sciences*. – 2019. – Том 9. – P. 4372 c.

References

1. AxeBlade Available at: <https://slb.com/products-and-services/innovating-in-oil-and-gas/well-construction/drilling/drill-bits/pdc-bits/axebblade-ridged-diamond-element-bit>.
2. Failure characteristics and service life prediction of polycrystalline diamond compact (PDC) cutter under cyclic impact loading / Yang Li et al. // *Geoenergy Science and Engineering*. – 2023. – Vol. 231. – P. 212993.
3. Pei Ju; Dongzhuagn Tian; Hongjie Tian. Simulation and Experimental Study on Rock Disintegration Characteristics of Special-shaped PDC Cutters // *Journal of Science*. – 2023. – Vol. 36(1). – Pp. 414–428.
4. StingBlade Available at: <https://slb.com/products-and-services/innovating-in-oil-and-gas/well-construction/drilling/drill-bits/pdc-bits/stingblade-conical-diamond-element-bit>.
5. Study on rock-breaking mechanism of axe-shaped PDC cutter / Fangyuan Shao et al. // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 205. – P. 108922.
6. Majdi Abd Rani, Kong Kai Vern, Azri Hamim Ab Adzis, TVVLN Rao. Effect of size and geometry of polycrystalline diamond cutter (pcd) on wear rate in multilayer formation // *Science International*. – 2017. – Vol. 29. Pp. 529–534.
7. Chao Xiong, Zhongwei Huang, Ruiyue Yang, Mao Sheng, Huaizhong Shi, Xianwei Dai, Xiaoguang Wu, Shikun Zhang. Comparative analysis cutting characteristics of stinger PDC cutter and conventional PDC cutter // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 189. – P. 106792.
8. Weiji Liu, Xun Meng, Xiaosong Weng, Xinyu Shen, Xiaohua Zhu. Rock-breaking performance of specially-shaped PDC cutters from a new insight into the damage beneath cutting groove // *Geoenergy Science and Engineering*. – 2023. – Vol. 231. – P. 213326.
9. Dong Z.; Zhang H.; Li J.; Zhang K.; Ou Y.; Lu Z.; Shi J. A Method for Evaluating the Rock Breaking Efficiency of Cutters and Optimizing the PDC Cutter Profile – A Study of Igneous Rock Formations in Shunbei Oilfield // *Energies Publ*. – 2022. – Vol. 15. – P. 6686.
10. Kong L.; Wang Z.; Wang H.; Cui M.; Liang C.; Kong X.; Wang P. Selection and Optimization Design of PDC Bits Based on FEM Analysis for Drilling Long Horizontal Sections of Shale Formations. *Processes* 2023, 11, 2807.
11. Xianwei Dai, Pengju Chen, Tao Huan, Jiaojiao Liu, Shuang Yan, Zouping Chen. Study on combined cutting and penetration of shaped PDC cutter under bottomhole condition // *Geoenergy Science and Engineering*. – 2023. – Vol. 229. – P. 212124.
12. ION+ 4DX Cutter Technology Available at: <https://nov.com/products/ion-4d-cutter-technology>.
13. Reza Rahmani. Rock Customized Shaped Cutters Improve Rock Cutting Efficiency / SPE/IADC International Drilling Conference and Exhibition, 2019.
14. Yijin Zeng, Wenhao He, Zheng Zhang, Huaizhong Shi, Jun Zhou, Shidong Ding, and Guangjun Ma. Rock-breaking performances of innovative triangular-shaped polycrystalline diamond compact cutter // *Review of Scientific Instruments*. – Vol. 92. – P. 035115.
15. Jianxun Liu, Hualin Zheng, Yuchun Kuang, Han Xie, Chao Qin. 3D Numerical Simulation of Rock Cutting of an Innovative Non-Planar Face PDC Cutter and Experimental Verification // *Applied Sciences*. – 2019. – Vol. 9. – P. 4372.