

Comment dévoiler le point de faiblesse atomique du carbure de bore ? En tordant B₄C sous pression !

Le carbure de bore B₄C est une céramique stratégique très dure qui constitue le choix idéal pour la réalisation de blindages légers. Pourtant B₄C a la particularité surprenante de perdre dramatiquement sa tenue mécanique lorsqu'il est impacté par un projectile à très haute vitesse. Cette limite constitue depuis plusieurs années une énigme scientifique alimentant de nombreuses hypothèses contradictoires dans la littérature. Pour comprendre - et donc être en mesure de dépasser - cette limite, des chercheurs de l'IMPIC ont réussi à déformer, en torsion, du B₄C sous pression et à caractériser le carbure de bore ainsi obtenu. La comparaison avec les calculs menés par une équipe de l'École polytechnique a permis de valider leur hypothèse théorique : cette limite s'explique par la formation de lacunes de bore dans la structure. Cette découverte ouvre la voie à la synthèse d'un nouveau B₄C aux propriétés mécaniques optimisées.

Le carbure de bore B₄C est une céramique réfractaire technologiquement très importante, principalement grâce à ses nombreuses propriétés exceptionnelles : haute dureté, faible densité spécifique, grande stabilité chimique, haute résistance aux effets d'irradiation... En outre, le noyau atomique ¹⁰B permet d'absorber très efficacement les neutrons. Ainsi, les applications de ce matériau vont de l'absorbant neutronique pour la régulation de puissance des réacteurs nucléaires aux équipements de protection balistique pour les avions militaires et la protection des personnes (gilets pare-balles). Cependant, quand il est impacté au-delà de la limite après laquelle il est en régime plastique (aussi appelée limite Hugoniot), B₄C perd mystérieusement sa résistance mécanique, ce qui conduit, au-delà de ce seuil, à la défaillance du matériau sous charge mécanique dynamique (choc par impact). Le principal objectif de nos travaux est d'essayer de comprendre ce phénomène surprenant pour ensuite tenter de synthétiser une nouvelle phase de carbure de bore qui pallierait ce défaut.

De nombreuses hypothèses ont été avancées pour expliquer la perte de tenue mécanique du carbure de bore sous charge dynamique, comme par exemple l'occurrence d'une transition de phase ou l'apparition de zones amorphes sous contraintes. Récemment, des calculs réalisés à l'École polytechnique ont prédit que ce phénomène pourrait être dû, à l'échelle atomique, à l'éjection de l'atome de bore B de la chaîne C-B-C qui relie les icosaèdres de type B₁₁C dans la structure B₄C (figure 1a.). Cette expulsion du bore sous contrainte dynamique donnerait ainsi des configurations atomiques carbonées C-lacune-C (figure 1b.) amenuisant considérablement la tenue mécanique ultérieure du matériau.

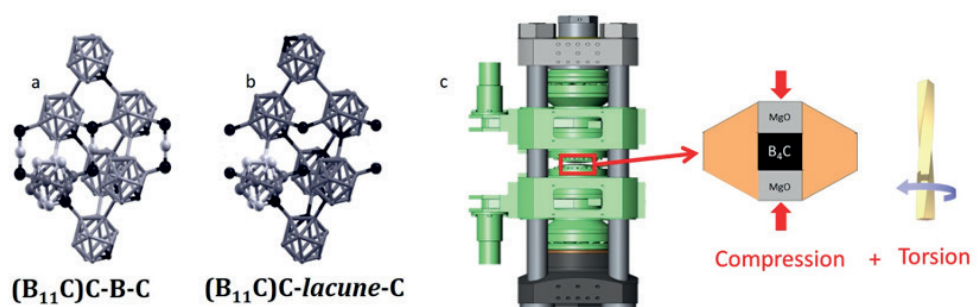


Figure 1

Structure atomique du carbure de bore dans l'état fondamental (figure 1a) et après déformation plastique (figure 1b). Les boules noires représentent les atomes de carbone, les boules grises représentent les atomes de bore aux sites équatoriaux et les boules blanches représentent les atomes de bore localisés sur un site polaire ou au centre des chaînes. Le dispositif expérimental de compression et de torsion du carbure de bore avec la presse RoToPEC est représenté sur la figure 1c. Les deux enclumes opposées (dans l'encart rouge) peuvent tourner indépendamment sous charge dans le plan perpendiculaire à la compression, sans limitation d'angle de rotation, grâce à deux ensembles composés d'une boîte de vitesse et d'une butée à rotule sur rouleaux situés à l'extrémité de chaque enclume (modules en vert sur la figure). La rotation précise (résolution de 0.005°) des enclumes se fait par des moteurs pas à pas et des codeurs optiques fixés sur les pièces entraînant les enclumes.

Pour trancher parmi toutes ces hypothèses, une série d'expériences conduite à l'IMPIC, à l'aide de la très récente presse Paris-Edimbourg à enclumes opposées tournantes pour tomographie (RoToPEC, presse brevetée au laboratoire, Cf. figure 1c), a permis d'appliquer sous haute pression des déformations en torsion au carbure de bore, le conduisant de façon contrôlée dans le régime plastique. Les dommages sur l'échantillon ont ensuite été analysés par micro-diffraction des rayons X au synchrotron SOLEIL sur la ligne PSICHÉ et par spectroscopie Raman à la plateforme de spectroscopie de l'IMPIC, et interprétés à l'aide de calculs du groupe de l'École polytechnique dans le cadre de la théorie fonctionnelle de la densité (DFT). Les nouveaux pics apparaissant dans les deux méthodes de caractérisation (Cf. pour exemple les diffractogrammes en figure 2) sont bien la signature de lacunes de bore dans les chaînes, en parfait accord avec les prédictions théoriques, confirmant donc l'hypothèse des lacunes comme sources d'affaiblissement mécanique.

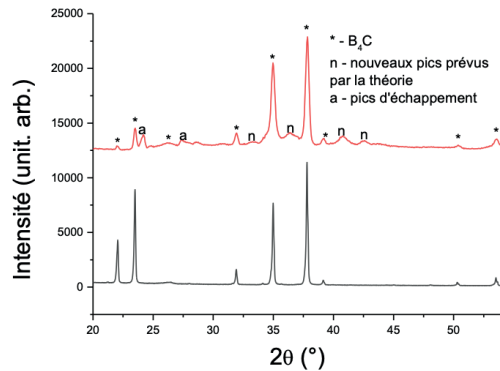


Figure 2

Diffractogrammes des rayons X (à la longueur d'onde $K_{\alpha 1}$ du cuivre) à l'ambiante de B_4C non déformé (en noir) et de B_4C ayant subi une déformation (en rouge) de 270° sous 5 GPa dans la presse RoToPEC. Les pics d'échappement sont non significatifs et correspondent à un artefact induit par le détecteur à semi-conducteur germanium. Les nouveaux pics (n) correspondent à la signature de lacunes de bore dans la structure B_4C .

Ces résultats remarquables, s'ils offrent une explication à un phénomène jusqu'alors incompris, permettent surtout de proposer une solution pour « durcir » davantage B_4C : réaliser un matériau ne contenant pas de chaînes C-B-C, mais plutôt des chaînes C-C ou des chaînes C-Si-C (en formant un ternaire B-C-Si). Ainsi, le groupe poursuit actuellement ses recherches dans le cadre d'un nouveau projet ANR (ANR-21-CE08-0018) dont l'ambition est de synthétiser ces matériaux optimisés.

Référence

“Boron carbide under torsional deformation: Evidence of the formation of chain vacancies in the plastic regime”

A. Chakraborti, A. Jay, O. Hardouin Duparc, J. Sjakste, K. Béneut, N. Vast and Y. Le Godec
Acta Materialia 226 (2022) 117553

Contact

yann.le_godec@sorbonne-universite.fr