Modeling of Abrasive Wear in Alloy Steel used in Metallurgy and Heavy-duty Applications

Dr. Nassim Ahmed Aldaher*

(Received 27 / 5 / 2025. Accepted 24 / 11 / 2025)

□ ABSTRACT □

This study focuses on microstructural and micromechanical modeling of abrasive sliding contacts of wear-resistant alloy steel 12Mn-3Ni-2.5Cr-2.1Mo. 3D finite element representation of the microstructure was employed with a crystal plasticity model including dislocation slip, deformation twinning, and their interactions.

The deformation occurring in this type of steel during surface tempering, dislocations caused by friction, and the formed twins and their interactions play an important role in the steel studied. Therefore, a micromechanical simulation of high-stress abrasion was created, simplifying the high-stress contact surface to polycrystalline deformation, and studying the relationship between wear and friction phenomena and deformation in alloy steels. Furthermore, the feasibility of analyzing a complex crystal model including displacement dislocations and deformed twins.

The results showed that deformation twinning interacting with dislocations had a key role in the surface hardening of the material, and it was also important for the early hardening process of the sub-surface grains beyond the heavily distorted surface grains. The effects of grain orientation and microstructural features were discussed and analyzed according to the micromechanical model to givea perspective to the anisotropy of the material and the feasibility of using micromechanics in virtual material design.

Keywords: crystal plasticity; micromechanical modeling of abrasion; alloy steel; deformation twinning.

Copyright **:**Latakia University journal (Formerly Tishreen) -Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

* **Ph.D., Design and Production Engineering, Materials Science and Engineering, Latakia University (Formerly Tishreen), Latakia, Syria.** nassimaldaher111@gmail.com

تحليل ميكروميكانيكي ثلاثي الأبعاد لسلوك التشوه والاهتراء في الفولاذ المقاوم للصدمات المستخدم في التطبيقات الشاقة

د. نسيم احمد الضاهر *

(تاريخ الإيداع 27 / 5 / 2025. قُبِل للنشر في 24 / 11 / 2025)

□ ملخّص □

تركز هذه الدراسة على المحاكاة الميكروميكانيكية للسطوح المتصلة عند الانزلاق والاهتراء الحكي بهدف توضيح مقاومة للاهتراء للفولاذ السبائكي Mn–3Ni–2.5Cr–2.1Mo12، إذ تم تمثيل عنصر ثلاثي الأبعاد والبنية المجهرية بالإضافة للانخلاعات الحاصلة بفعل الاحتكاك الحكي والتوائم المتشكلة وتفاعلاتها بوساطة برنامج Abaqus الهندسي.

يمثل التشوه الحاصل في هذا النوع من الفولاذ في التقسية السطحية، و الانخلاعات الحاصلة بفعل الاحتكاك الحكي والتوائم المتشكلة وتفاعلاتها دوراً مهماً في الفولاذ المدروس. ولذلك تم إنشاء محاكاة ميكروميكانيكية للحك عالي الإجهاد، بتبسيط سطح الإتصال عند الإجهاد المرتفع إلى التشوه متعدد البلورات، ودراسة علاقة ظاهرة الاهتراء والاحتكاك مع التشوه في الفولاذ السبائكي. إضافة إلى تقييم إمكانية تحليل نموذج معقد البلورات بما فيه من انزياح الانخلاعات والتوائم المشوهة.

بينت النتائج أن تفاعل التوائم المتشكلة مع الانخلاعات يلعب دوراً هاماً في التقسية السطحية للفولاذ المدروس، كما أنه مهم لتقسية الحبيبات تحت السطحية المتوضعة تحت الحبيبات السطحية المتحطمة بفعل الاهتراء وتمت مناقشة تأثير اتجاه الحبيبات والبنى الحبيبية وفق النموذج الميكانيكي لإعطاء تصوّر للفولاذ المدروس ومدى فعالية المحاكاة الدقيقة في تصميم المواد عالية القساوة.

الكلمات المفتاحية: اللدونة، البلورات، النمذجة الميكانيكية للاهتراء الحكي، فولاذ سبائكي، التوائم المتشكلة.

حقوق النشر : مجلة جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)– سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص CC BY–NC–SA 04

* **دكتوراه، علم المواد وهندستها، هندسة التصميم والإنتاج، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)، اللاذقية، سوريا. nassimaldaher111@gmail.com**

مقدمة:

يستعمل الفولاذ السبائكي 12Mn–3Ni–2.5Cr–2.1Mo في التطبيقات ذات اجهاد الحك العالي والحمولات الصدمية المرتفعة [23][5–1]، مثل التطبيقات المتعلقة بعلم التعدين وتكسير الصخور، ويتميز الفولاذ الأوستنيتي بالتصلّد الانفعالي أثناء العمل مع قابلية تشكيل عالية مناسبة للحالات التي يتعرض فيها السطح لإجهاد مفرط.

كنتيجة، يتميز هذا الفولاذ بمقاومة اهتراء عالية ولذلك يفضّل في التطبيقات التي تواجه شروط اهتراء حكي عالٍ. ويتميز بالتصلّد الانفعالي العالي من خلال التوائم النشطة عند التشكيل بالإضافة للانخلاعات.

الخاصية الأخرى هي نمط التشوه والذي يشمل التفاعل بين أنماط وآليات التشوه. في هذا النمط تقسم حدود التوائم حبيبات الأوستنيت الكبيرة إلى حبيبات أصغر تساهم في التصلد الانفعالي. تنشط حدود التوائم كعوازل وحدود تمنع الانخلاعات وهناك أمور أخرى تحسّن من قابلية التصلد الانفعالي مثل تشكّل جدران الانخلاعات [6,7]، والانفعال الديناميكي للزوج Mn–C [10–8].

كما يعتمد معدل الانفعال على البنية الشبكية متمركزة السطح (FCC). وقد يؤدي الانفعال الديناميكي منخفض القيمة إلى معدل انفعال سلبي في بعض التراكيب [11,12]. تسبب معدلات الانفعال الديناميكي الإيجابية عند الصدم زيادة في تدفق المادة (التشوه). بالنسبة للاهتراء فإن أي زيادة في مقاومة التشوه عند معدلات انفعال عالية يمكن أن تؤثر على مقاومة الصدم عندما تبقى المادة مرنة.

أهمية البحث وأهدافه:

1–أهمية البحث:

تأتي أهمية البحث من دور التشوه الحاصل في هذا النوع من الفولاذ في التقسية السطحية في أدوات التعدين والكسارات، ودور الانخلاعات الحاصلة بفعل الاحتكاك الحكي والتوائم المتشكلة وتفاعلاتها، وقد تم اختيار برنامج Abaqus بسبب دقته وقوته في التعامل مع المشاكل غير الخطية المعقدة في علم المواد بالإضافة لمرونة البرمجة فيه والحصول على نتائج مستقرة.

2–هدف البحث:

يهدف البحث من خلال المحاكاة إلى:

–إنشاء محاكاة ميكروميكانيكية للحك عالي الإجهاد خصوصاً في أدوات التعدين والكسارات، بتبسيط سطح الإتصال عند الإجهاد المرتفع إلى التشوه متعدد البلورات بإهمال تأثير درجة الحرارة والتشوه الحراري.

–دراسة علاقة ظاهرة الاهتراء والاحتكاك مع التشوه في الفولاذ السبائكي.

–تقييم إمكانية تحليل نموذج معقد البلورات في أحد أهم أنواع الاهتراء والإحتكاك بين السطوح بما فيه من انزياح الانخلاعات والتوائم المشوهة لوصف سلوك التشوه المعقد في الفولاذ السبائكي.

3–مشكلة البحث:

تأتي من أهمية وتأثير اتجاه الحبيبات والبنى الحبيبية في تصميم المواد عالية القساوة، ودورها الفعال في زيادة العمر الاستثماري لهذه المعادن.

ركّزت العديد من الأبحاث على كشف التشوه، القساوة، وآلية الفشل للفولاذ الأوستنيتي عالي المنغنيز [17–13, 8]، وتهدف المحاكاة لتبسيط الأمور وتمثيلها عددياً، إذ ركّز الباحث [18] على السلوك المفرد والمتعدد البلورات للمادة وأيضاً على حجم الحبيبة وعلاقته بالنموذج اللدن البلوري. وقد توافقت نتائجهم التجريبية مع النموذج لكنها تفتقر لدراسة البنية المجهرية.

درس الباحث [19,20] سلوك البنى الحبيبية المختلفة مع البنى المجهرية مما أعطى المزيد من المعلومات عن البحث. كما بحث [7,12] تأثير إضافة النتروجين وسبائك الألمنيوم على المادة وفق الطريقة العددية للحصول على سلوك ميكانيكي أفضل. قام الباحث [11,12,19] بدراسة تجريبية وتوصلوا لنتائج مهمة تجريبياً من حيث تحسين الخواص الميكانيكية، ودرس الباحث [13] عددياً التصلد الانفعالي الناتج عن التوائم نانوية الحجم وتفاعلها مع الانخلاعات المزاحة (المنزلقة)، مع الإشارة للتأثير المهم لدرجة الحرارة ومعدل الانفعال.

قام الباحث [9] بدراسة سلوك فولاذ هادفيلد وبنيته المجهرية تحت تأثير حمولات الصدم وعلاقته بسلوك الاهتراء. درس الباحث [16] الانفعال الديناميكي وتأثيره على التصلد الانفعالي في فولاذ هادفيلد التقليدي 14%–10 منغنيز، 1– 1.4% كربون. وأُستعملت المعلومات في توسيع نطاق البحث واجراء المحاكاة [8,14].

يمكن التنبؤ بالفشل الناتج عن الاهتراء عن طريق التجربة والمحاكاة [17,20]، ويشمل النموذج المتعلق بالاهتراء الحكي والصدم الجزيئات المشوهة المتصلة مع بعضها أو المادة المهترئة بحد ذاتها. نظراً للطبيعة المعقدة في علم الإحتكاك والاهتراء، تتم الاستعانة بخواص الجزيئات والمادة السطحية المحيطة. يمكن أن يكون للجزيئات أشكال معقدة وهو محور اهتمام في المرجع [2]. من ناحية أخرى يمكن أن تعبر المادة السطحية عن السلوك الميكانيكي [18]. إن الهدف الرئيسي للمحاكاة هو زيادة فهم التشوه الحاصل وظاهرة الاهتراء.

بالرغم من استعمال الفولاذ المقاوم للاهتراء في الكثير من التطبيقات، لم يلق موضوع المستويات البلورية الاهتمام الكافي عند دراسة السطوح المحتكة. ويحتاج فهم سلوك التشوه في المواد عديدة البلورات في مستوى الثلم (الخدش) للعديد من التجارب حسب الباحث [12,13]

حلل الباحث [4] رد فعل التشوه الحاصل من التشكيل باختلاف البلورات واللدونة البلورية مع اجراء ثلم بسيط، كما قام الباحث [11] بالجمع بين اللدونة البلورية والتحميل بالسفع بتقنية نقل الحمولة وذلك للتنبؤ بالإجهاد السطحي المتبقي. مؤخراً درس الباحث [7] تأثير الصدم بالاتجاه العادي على المادة متعددة البلورات وحللوا التشوه وسلوك التقسية الحاصل مع المرونة البلورية عند اتصال السطوح. تمت دراسة السطوح المتصلة الخشنة لكشف التشوه وسلوك الاتصال عن طريق المرونة البلورية [6,15]. عموماً حددت هذه النماذج التشوهات الصغيرة نسبياً وشديدة الانزلاق، ولم يتطرق الباحثون لدراسة أثر الحك عالي الاجهاد بوجود الجزيئات المنزلقة على المواد متعددة البلورات.

في الدراسة [21] تمّت عملية صب العينات من فولاذ هادفيلد صنف D في القوالب الرملية والمعالجة الحرارية (متغيرة الزمن ودرجة الحرارة) لعدد من العينات بالإضافة لتطبيق تغييرات في طريقة التبريد قبل المعالجة الحرارية وقياس القساوة ومتانة الصدم ومقاومة الاهتراء للعينات قبل وبعد المعالجة الحرارية ، بيّنت النتائج زيادة في القساوة وبالتالي زيادة مقاومة الاهتراء كما ازدادت متانة الصدم نتيجة المعالجة الحرارية، وتغيير طريقة التبريد بعد الصب وقبل المعالجة الحرارية، وبالتالي أصبح الفولاذ الناتج اكثر تحمّلاً لظروف الخدمة مما يعطي جدوى اقتصادية للبحث بالإضافة لأهميته العلمية.

في الدراسة [22] تم العمل على إضافة معدني الكروم والمولبيدينوم إلى فولاذ هادفيلد المصنوعة منه مطارق الكسارات وأسنان الحفارات. تمّت عملية صهر المعادن اللازمة لتشكيل فولاذ هادفيلد مع كروم ومولبيدينوم بنسب مختلفة وفق صهرتين ثم صب العينات في القوالب الرملية والقيام بالتبريد السريع في الماء بعد الصب، ثم اختبار الصدم والاهتراء والقساوة على العينات، بيّنت النتائج زيادة في القساوة وبالتالي زيادة مقاومة الإهتراء كما ازدادت متانة الصدم نتيجة إضافة الكروم والموليبدينوم.

في الدراسة [23] تم اجراء المعالجة الحرارية لفولاذ هادفيلد صنف D المضاف له مولبيديوم وكروم (صنف جديد يختلف عن تصنيفات ASTM A!28) وفق برنامجين مختلفين للمعالجة الحرارية 1، 2 ومقارنة الخواص الميكانيكية كمقاومة الاهتراء ومتانة الصدم والقساوة بعد المعالجة الحرارية 1، 2. إذ أنّ وجود الكربيدات على حدود الحبيبات والناتجة عن صب الفولاذ المشكّل يؤدي لزيادة الهشاشة وقابلية الكسر نظراً لترسب الكربون بسبب سرعة التبريد المرتفعة ولذلك تهدف المعالجة الحرارية لإذابة هذه الكربيدات وتنعيم البنية المجهرية وبالتالي صلاحية فولاذ هادفيلد للعمل وقد تم التقييم بمعالجتين مختلفتين.

في الدراسة [30] ركز الباحث على نمذجة التلامس الكاشط للفولاذ المقاوم للاهتراء باستخدام نموذج بلاستيك بلوري ثلاثي الأبعاد. أظهرت النتائج أن التوأمة التشوهية والتفاعل مع الانزلاقات تلعب دورًا رئيسيًا في تقوية السطح، مما يساهم في تحسين مقاومة الفولاذ للاهتراء في التطبيقات الصدمية.

في الدراسة [31] تُقدّم هذه الدراسة تقييمًا تجريبيًا لسلوك الفولاذ Cr–Ni–Mo–V تحت تأثير الإجهادات الصدمية. أظهرت النتائج حدوث انتقال طور $\alpha \rightarrow \varepsilon$ عند إجهاد صدمة 15.63 جيجا باسكال، مما يؤثر على سلوك التشوه والاهتراء.

في الدراسة [32] ركّز الباحث على الفولاذ المارتينسيتي المقاوم للاهتراء المعزز بجسيمات TiC. أظهرت النتائج أن إضافة جسيمات TiC ميكرونية ونانوية تحسن مقاومة الفولاذ للاهتراء دون زيادة كبيرة في الصلابة، مما يجعله مناسبًا للتطبيقات الصدمية.

في الدراسة [33] قدّم الباحث تحليلًا تجريبيًا ورقميًا لسلوك الفولاذ TP316H تحت تأثير الصدمات. أظهرت النتائج أن آلية الاهتراء الرئيسية تشمل التفتت، التآكل، والتشوه البلاستيكي، مما يشير إلى أهمية تحسين تصميم المواد لمقاومة الصدمات.

طرائق البحث ومواده:

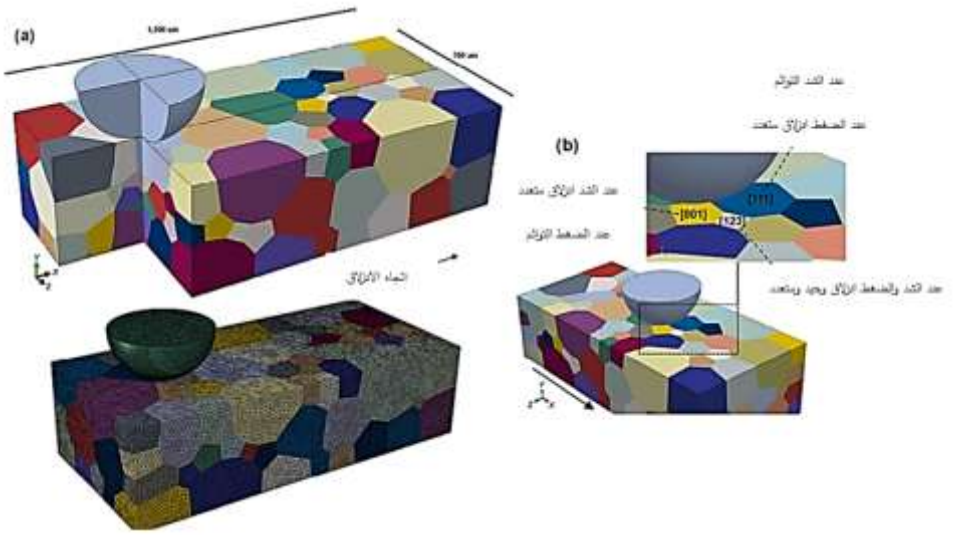
ركزت المحاكاة على تقييم الحالة الإجهادية والانفعال المتعلق بالتشوه في البنية المجهرية وعلى حالة التوائم حول منطقة الخدش أو الثلم.

توفر المحاكاة معلومات هامة عن متانة الشد والضغط للفولاذ السبائكي لتقييم حالة الإجهاد المعقد الناتج عن السطوح المتصلة بفعل الحك. أمّا معايير المحاكاة فيمكن تلخيصها:

1–إهمال تأثير درجة الحرارة والتشوه الحراري.

2–تم اختيار كثافة الشبكة Mesh لتكون متوسطة الخشونة للمحافظة على الكفاءة الحسابية لنموذج البلورة عند اتصال السطحين، واشتملت على 150 حبيبة في العنصر المدروس مع مجموع حوالي 1658792عنصر خطي رباعي الوجوه ثلاثي الأبعاد يحوي 4 عقد يرمز له C3D4.

3–بلغ حجم العنصر 1.5 X 0.7 X 0.5 mm وتم تطبيق شروط الإزاحة الحدية على الوجوه الخارجية ماعدا الوجه من جهة الاتصال وذلك لتجنب التشوه عن سطح الاتصال.



الشكل (1) (a) انزلاق المادة الحاكة على الفولاذ الأوستنيتي عالي المنغنيز، (b) اتجاهات البلورة الوحيدة في مسار الخدش

تم البحث في حالتين الأولى للكشف عن تشوه وسلوك تقسية المادة عند الاتجاهات العشوائية كما في العينات الناتجة عن الصب. والحالة الثانية هي تأثير بلورة مفردة وحيدة الاتجاه البلوري على المادة كما الشكل (1). قام الباحث [16] بالتحليل التجريبي لآليات التشوه في هذه الاتجاهات. يميل الاتجاه [001] إلى تشوه التوائم وفق الانضغاط أحادي المحور والتشوه بفعل الانزلاق الناتج عن الشد. يتشوه الاتجاه [111] بفعل الانزلاق بالضغط وتظهر التوائم المتعددة عند الشد. ويتشوه الاتجاه [123] بشكل منتظم ويتبعه نشاط للانزلاقات المتعددة عند التشوه في كل من حالتي الشد والضغط. تم تنفيذ نموذج المرونة وفق Z-set باستعمال برنامج Abaqus/Standard FE-solver via ZMAT- interface. يؤدي الخدش لتشوه مرن بمعامل يونغ قيمته 1.14 Gpa ونسبة بواسون 0.07، وتم اعتبار السطوح ناعمة بشكل مثالي. تم ضبط سرعة الانزلاق 0.1 mm/sec عند النمذجة ومعامل الإحتكاك 0.19 وقيمة الحمولة 40 N كما في الحالة التجريبية [39].

إن علاقة الثلم والمادة متعددة البلورات مع السطحين المتصلين علاقة غير مقيدة وتم استعمال طريقة الصدم أو السفع لتوصيف الاتصال بينهما وعلاقات العناصر المنتهية لمحاكاة الانزلاق. يتشكل الانزلاق والاتصال بين السطوح بفعل توليد الحركة بالنسبة لأداة الحك الألماسية المسببة للثلم، ويزداد عمق الثلم مع الانزلاق الحاصل بزيادة سعة الإزاحة الحاصلة. يصل الإختراق خلال الإنزلاق لقيمة 7 ميكرومتر في الحالة الأولى و6 ميكرومتر في الحالة الثانية. يمكن اعتبار تجارب أداة الحك الألماسية واللقم الكربيدية بوجود التشوه السطحي شرطاً للحك عالي الإجهاد [4]. كمثال على العملية يسبب رأس لقم الغرانيت تشوهاً سطحياً حوالي 5 ميكرومتر على الفولاذ عالي المقاومة في اختبار الخدش مع احتمال لكسر اللقمة خلال الإختبار، مما جعل القيمة المقترحة لحالة الحك عالي الإجهاد قيمة محددة [4]. وللتبسيط تم تنفيذ المحاكاة على عينة ناتجة عن الصب دون تشوه مسبق وأي إجهادات متبقية.

النتائج والمناقشة:

يبين الشكل (2) الإجهاد المكافئ والأول المعتمد على البنية المجهرية للحالتين. ظهرت قيم عالية للإجهاد المكافئ حوالي 1350 Mpa قريباً من السطح (باللون الأحمر)، بسبب تقسية المادة. تمت ملاحظة اختلاف الإجهاد بين

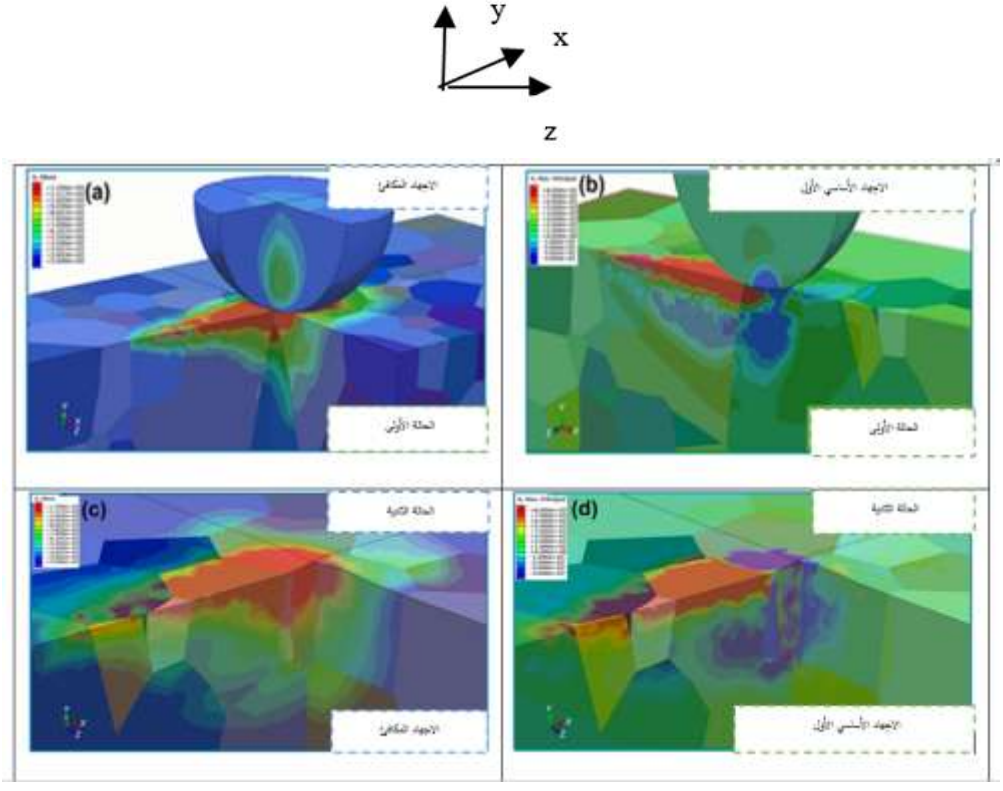
الحبيبات إذ تتركز الإجهادات المختلفة على حدود الحبيبات وداخلها وتتعرض حدود الحبيبات لإجهادات عالية تعتمد على علاقة الحبيبات مع بعضها وكتلة الانزلاق والتوائم وهذا يتفق مع الدراسات السابقة [19,20,25]. يعود سبب اختلاف الإجهادات داخل الحبيبات إلى زيادة عمق الاختراق للجزيئة الحاكة، وتطور التوائم المشوهة حسب الشكل (3). نلاحظ قيم إجهاد حوالي 700 Mpa في المنطقة تحت السطحية على بضع حبيبات (باللون الأخضر). يعتبر هذا الإجهاد كافٍ للثلم الأولي (بداية التثليم) وتشكل التوائم مما يعطي قساوة داخل المادة. تبين مخططات الإجهاد الرئيسية الأولى في الشكل (2b, 2d) توزع الإجهاد الرئيسي تحت الانزلاق الحاصل بين السطوح المتصلة في المادة عديدة البلورات. ولوحظت إجهادات الضغط في الجزء الأمامي والسفلي للانزلاق (باللون الأزرق)، وهو إجهاد سلبي في هذه المناطق. تعبر حالة الحافة النهائية للاتصال والمنطقة خلف أداة الحك المنزلقة عن حالة إجهاد شد عالي حوالي 1500 Mpa وهي أعلى من الإجهاد القريب من السطح. تتعرض الطبقة تحت السطحية لضغط عالي جداً من الطبقة السطحية المشوّهة، ونلاحظ تفاوت كثافة الإجهاد الرئيسي الأول حسب بنية وحجم الحبيبات وتأثير اتجاه الحبيبات المجاورة حسب الشكل (2d). يبين الشكل (3a) الانفعال اللدن المتكتل بسبب انزلاق الانخلاعات والتشوه.

أي أنّ قيم الإجهاد هي:

1- 1350 Mpa قريباً من السطح.

2- 700 Mpa في المنطقة تحت السطحية على بضع حبيبات.

3- 1500 Mpa عند الحافة النهائية للاتصال والمنطقة خلف أداة الحك المنزلقة.



الشكل (2) الإجهاد المكافئ *a, c* مع إجهاد 200-1200 Mpa، والشكل *b, d* الإجهاد الرئيسي الأول 400-800 Mpa أثناء الخدش لكل من الحالتين الأولى والثانية

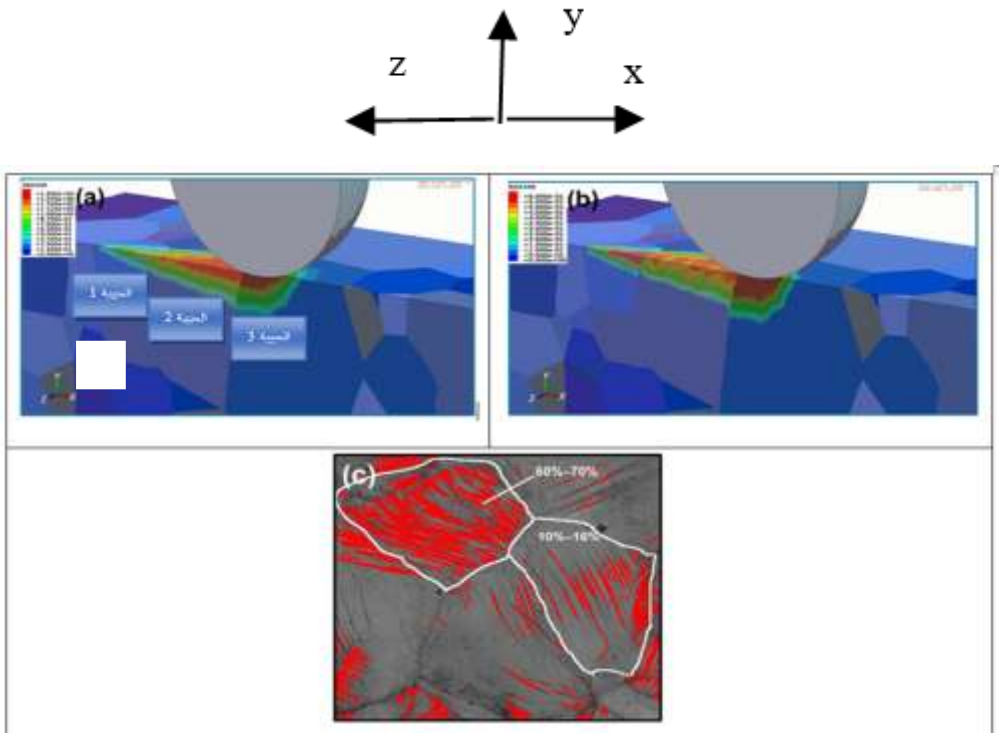
تجاوز التشوه اللدن المتراكم على طبقة رقيقة جداً من السطح 150% (المنطقة باللون الأحمر)، لكن حدثت المرونة على السطح الثانوي، ووصل الانفعال اللدن المتراكم لأكثر من 50% في المنطقة باللون الأخضر. زاد اختراق أداة الحك من التشوهات الحاصلة في منطقة التشكيل، ويبين الشكل (3b) الكسر الحجمي الحاصل في التوائم والذي يعتمد على زيادة الاختراق في السطح وعلى اتجاه الحبيبات.

يمثل اللون الأحمر في المخططات كسر حجمي للتوأم أكبر من 0.5. على سبيل المثال تبين الحبيبة 1 كسر حجمي بالقرب من السطح في قيم منخفضة للاختراق مقارنة مع الحبيبة 2. في الحبيبة 3 يتطور التوأم اللاخطي مع عمق توزع التوائم في المادة. ونلاحظ الاختلاف في الكسر الحجمي التوأمي ضمن المنطقة المشوهة بشدة، من صغير 0.3 إلى قيمة مرتفعة عظمى 0.85.

تمت ملاحظة القيم الأعظمية في أسفل الثلم وبالقرب من حدود الحبيبات. وتظهر أقل قيم للكسر الحجمي التوأمي في منطقة الحافة المهترئة وهي أقل من المنطقة أمام أداة الحك المنزلقة. يبين الشكل (3c) حبيبتين بكمية مختلفة من التوائم المشوهة بعد اختبار الضغط غير المحوري. والكسور الحجمية للتوائم المشوهة هي نفسها الناتجة عن التحليل بانحراف الحزمة الإلكترونية [19].

تقابل كثافة الحبيبات التوأمية المنطقة التوأمية والمشوهة بالقرب من السطح بينما الحبيبات الأقل كثافة توأمية تقابل المنطقة الثانوية تحت السطح ويمكن أن نستنتج من تحليل العينة أن الكسور الحجمية الأقل توأمية، يمكن أن تقلل الحدود التوأمية من حجم الحبيبة الفعال وتسبب تقسية المادة.

تبين المحاكاة الأنظمة التوأمية العديدة 3–6 التي تنشط في مطقة الخدش السفلية. إن وجود عدد كبير من الأنظمة التوأمية شكّل شبكة فعالية من العوائق ضمن الحبيبات.



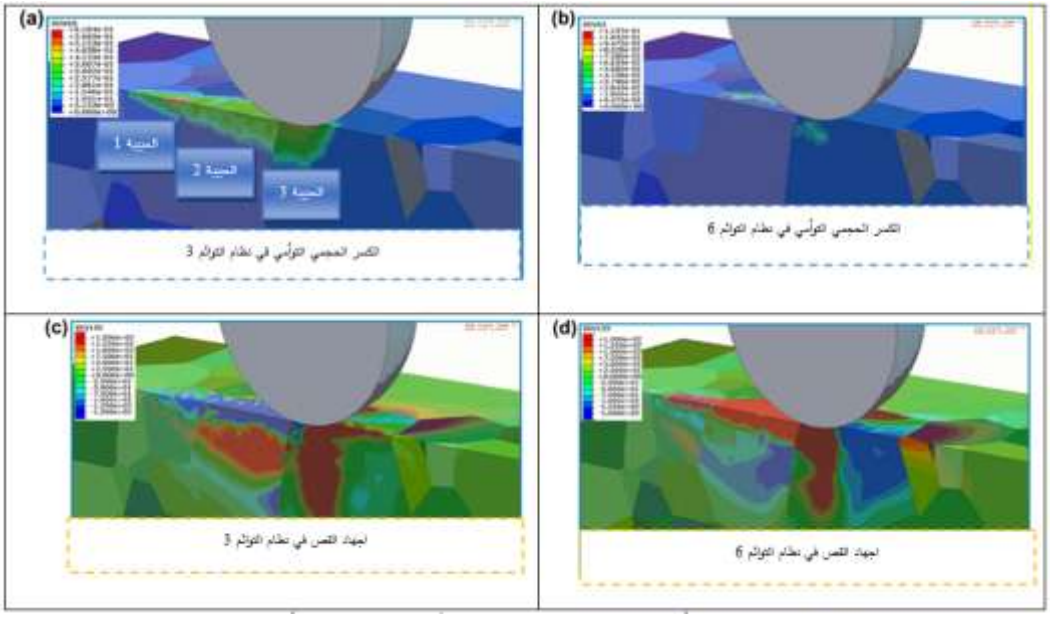
الشكل (3) *a* الانفعال اللدن المتكتل بسبب الانزلاق والتوائم المشوهة باللون الأحمر وهو 1.5، *b* الكسر الحجمي للتوائم 0.5، *c* حبيبتين توأميتين مع حجم كسر متوسط للتوائم بعد اختبار الضغط غير المحوري [3]

يبين الشكل (4) النشاط الأحادي للتوائم في مستويات توأمية مختلفة. يساهم النظام التوأمي 3 بفعالية كبيرة في الكسر الحجمي التوأمي اكثر من النظام 6. تتركز مساهمة النظام التوأمي 3 في أسفل الثلم ونلاحظ نشاط قليل له في الحافات النهائية للثلم، حيث يساهم النظام بقوة في التوائم، ويعتبر إجهاد القص التصميمي قوة دافعة محفزة لظاهرة التوائم في النموذج الحالي، ويبين اتجاه الحبيبات المتوقع ومن الملاحظ أن إجهاد القص التصميمي يعتمد على اتجاه الحبيبات ولايساوي إجهاد القص عند الانزلاق والاتصال. تتوضع التوائم في النظام 3 في منطقة الانضغاط عند الانزلاق والاتصال، في مقدمة وأسفل أداة الحك المنزلقة، حيث يكون إجهاد القص التصميمي إيجابياً.

عند تحليل الحبيبات 1 و 2 تظهر التوائم بعد الاتصال عند الحافة النهائية للاتصال بسبب اجهاد القص التصميمي السلبي للنظام التوأمي مما يمنع نمو التوائم بسبب التوائم ذات الشبكة البلورية متمركزة الوجوه (تأخذ التوائم مكاناً في الاتجاه الموجب فقط).

يمكن أن يحدث التوأم في النظام 6 في المنطقة النهائية للاتصال في أسفل الثلم لكن التقسية تحدث من النظام 3 المتوقف نشاطه بالكامل. بالتالي لدى الحبيبة 3 اتجاه مناسب لكل من نظامي التوائم وزادت المساهمة في كلا النظامين.

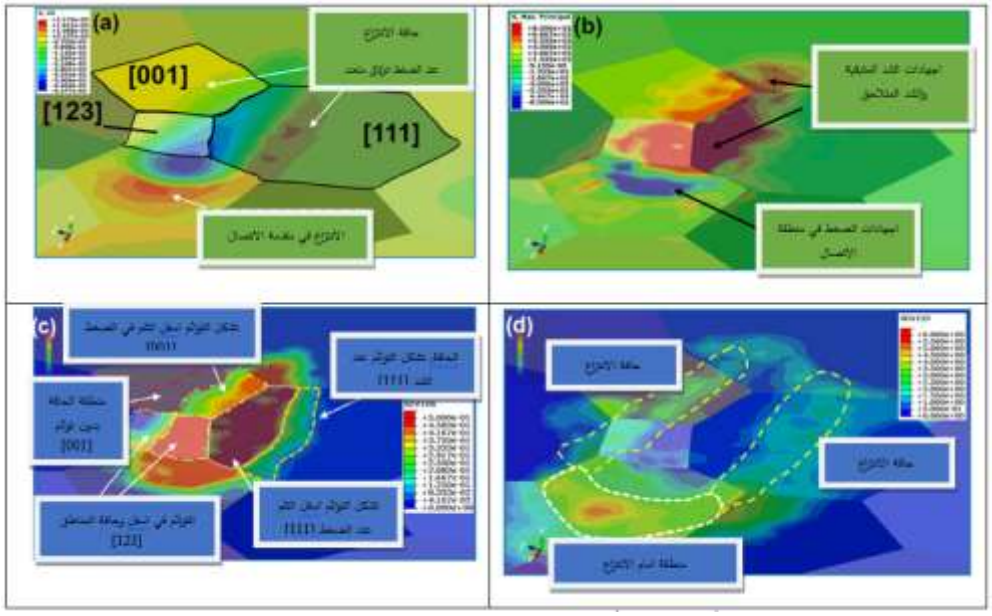
تبين النتائج أن وجود ونمو نوى التوائم يعتمد على حالتي الإجهاد المشار إليها بالجزيئات الحاكة بالإضافة للاتجاه. ويختلف نشاط التوائم بين أسفل الثلم والحافة بسبب اختلاف الإجهاد.



الشكل (4) الكسر الحجمي التوأمي واجهاد القص التصميمي في (a) النظام التوأمي 3، و(b) النظام التوأمي 6 للحالة 1، ويدل اللون الأحمر على إجهاد القص الإيجابي واللون الأزرق على الإجهاد السلبي

في حالة المحاكاة الثانية تم التركيز على تأثير الاتجاه بتفصيل أكثر، ويبين الشكل (5) محاكاة الاتجاهات الثلاثة المميزة [123] ,[001] ,[111] حيث أن الشكل (5a) يوضح الاتجاه والتشوه أثناء محاكاة الثلم. ويبين مخطط الإزاحة المعمقة (باتجاه العمق والارتفاع) تشوه الحبيبات. ويتطور الاتجاه [111] اكثر بمرتين من منطقة الحافة المنتزعة مقارنة بالاتجاه [001]. أحد التفسيرات للسلوك السابق أن الاتجاه [111] أقسى من [001]، وقد أبدت الحبيبات التوأمية في الاتجاه [111] نعومة أولية عند التشوه قبل التقسية الشديدة وبكسر حجمي أكبر. في منطقة الانضغاط عند الانزلاق، أبدت الحبيبات التوأمية انتقالاً وفق الاتجاه [001] بينما كان الكسر الحجمي للتوائم صغير جداً في منطقة الصدم. وعلى الرغم من التناظر بين الشد والضغط للاتجاه [111] فإن آلية التشوه والاجهاد موجودة

ويمكن أن تتطور حالة الإجهاد المعقد ثلاثي المحاور في حالة الإجهاد الرئيسي في الضغط (أسفل الثلم عند الاتصال) أو في الشد (منطقة الحافة). أبدى الاتجاه [123] الأحادي غير المحوري خلال محاكاة الثلم حالة توائم شديدة تشكلت غالباً أثناء مرحلة الانضغاط وتزايد الكسر الحجمي التوأمي قليلاً بعد الاتصال.



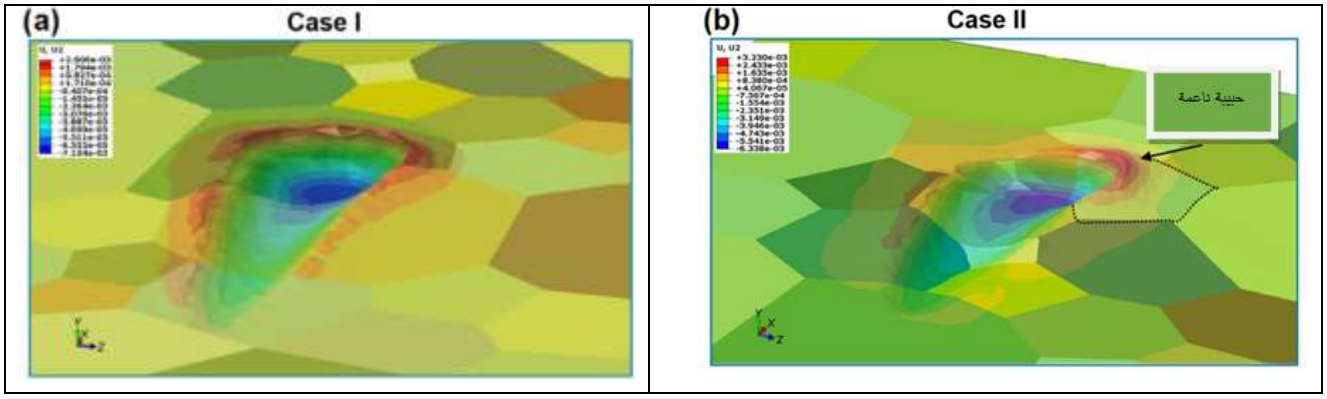
الشكل (5) a إزاحة بعمق كبير أثناء المحاكاة واتجاهات محددة للحبيبات، b الإجهاد الرئيسي الأولي، c الكسر الحجمي التوأمي باللون الأحمر 0.5، d عدد الأنظمة التوأمية النشطة باللون الأحمر هي 6

بشكل عام كانت التوائم المشوهة أقل وضوحاً في منطقة الحافة النهائية ويمكن أن يكون السبب قلة التشوه وصغره (أقل مما هو عليه في المنطقة أسفل الثلم). وتبقى مناطق الكسور الحجمية التوأمية بين 0.1 و0.3 بينما نشأت العديد من التوائم في أسفل الثلم بين 0.5 و0.85. الشيء الوحيد المؤثر على التوائم في كافة الاتجاهات هو مكان نزع الجزيئات المهترئة أما الإبرة المنزلقة مما يولد اللدونة بسبب انزلاق الانخلاعات والتوائم. يمكن أن يُعاد توجيه الحبيبات عن طريق التشوهات المنزلقة وفق اتجاه التوائم. ويبين الشكل (5d) عدد الأنظمة التوأمية النشطة خلال محاكاة الثلم. يمكن ملاحظة حدوث الإشباع (استقرار اللون وصفاءه في المحاكاة) في أسفل الثلم خلف أداة الحك المنزلقة لكن المناطق الإخرى تبقى نشطة. بشكل خاص بقيت حوالي 4–6 أنظمة توأمية نشطة أمام أداة الحك المنزلقة في منطقة الاهتراء مما يولد التوائم الميكروية في هذه المنطقة. وقد يكون سبب ذلك مقدار اللدونة والإجهاد العالي في المنطقة وساهم أيضاً تأثير إعادة التوجيه للتشوه الانزلاقي. تُظهر الحافة النهائية المنتزعة عدداً أقل من التوائم النشطة مثل 3 في معظم الحالات و4 في بعض الحالات. ولوحظ اختلاف واضح في عدد أنظمة الانزلاقات النشطة من 2 إلى 8 في المناطق اللدنة. يبين الشكل (6) محاكاة الثلم والتشوه الناتج، وتم رفع مستوى التشوه بوساطة العامل 5 لتوضيح البنية المجهرية المؤثرة على التشوه. وبينت الحالة الثانية تشكيل مميز للانتزاع الحاصل أمام أداة الحك المنزلقة. تشارك الحبيبات الناعمة في الانتزاع، وقد تكون مهمة عند تقييم القص في أداة الحك أثناء الحك، لمعرفة الآليات التي تقلل التوائم وتمنع القص الأولي والانتزاع الميكروي الذي يشبه الاهتراء الميكروي في الحك.

السلوك الميكروميكانيكي عند تلامس السطوح واحتكاكها:

يتم العمل باهتمام على نمذجة التلامس عند احتكاك السطوح مثل الحك وذلك لفهم الأحمال والقوى الناتجة عن التلامس وآلية تشكل الجزيئات المهترئة. وعند الحك عالي الإجهاد بالصخور الطبيعية مثلاً، تكون الظروف المحيطة صعبة جداً

للكثير من المواد بما فيها الفولاذ المقاوم للاهتراء. في أغلب الحالات لاتأخذ النماذج الرياضية المدروسة البنية المجهرية بعين الإعتبار نظراً لصعوبة الربط بين البنية المجهرية، ظروف العمل، الاحتكاك، التقسية، والاهتراء. وقد ركزت الدراسة الحالية على نمذجة جزيئات الحك القاسية المنزلقة على مادة عديدة البلورات لإعطاء تصور ميكروميكانيكي للحك. يشمل النموذج اللدن البلوري ونموذج الاتصال كلاً من التشوهات المجهرية وتقسية الفولاذ. ومن العوامل التي تؤثر في الاهتراء حجم وبنية الحبيبات وتوجهها وتوزعها، مقاومة المادة للتشوه.



الشكل (6) التشوهات السطحية في كل من الحالتين الأولى والثانية، وقد تم رفع مستوى التشوه إلى 5 للتوضيح

الاتجاهات البلورية حسب الفولاذ المدروس عند الحك:

بينت النتائج نشوء إجهاد ثلاثي المحاور حول منطقة الاتصال عند انزلاق الجزيئات الحاكة على سطح المادة عديدة البلورات. من ناحية الإجهادات الرئيسية الأولى يمكن أن يصنف إلى حالتي إجهادات الضغط وإجهادات الشد، وقد بينت النتائج وجود إجهادات الضغط في المنطقة الأمامية وتحت منطقة الاتصال مع غياب لإجهاد الشد. لاحظ الباحث [29] توزع الإجهادات المتماثلة كما في حالة الطلاء، كما تشمل النماذج اللدنة متعددة البلورات اتجاهات أكثر تعقيداً بالإضافة لآليات تشوه مع كثير من التفاصيل والتي تكشف عن تموضع الإجهاد. بشكل عام تعتبر الإجهادات قليلة وقابلة للدراسة في مناطق الاتصال.

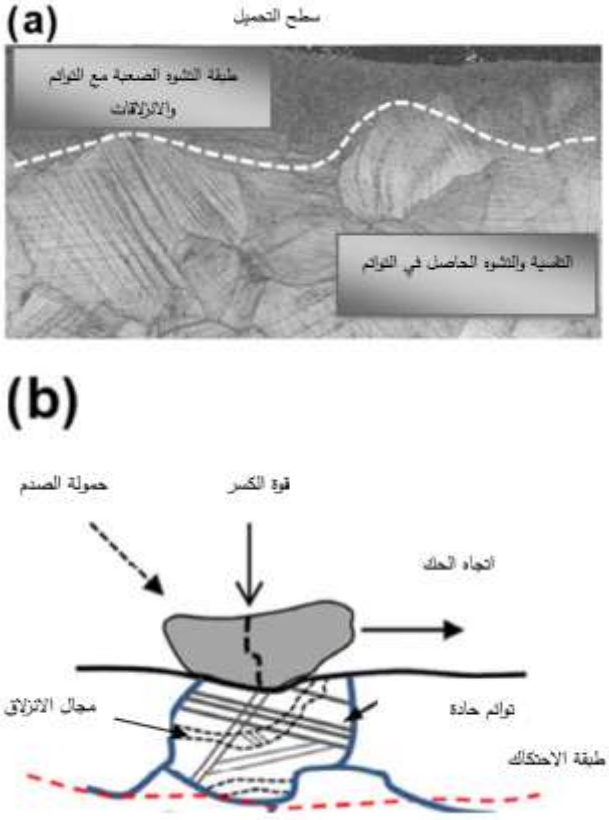
ويمكن من دراسة الاتجاهات البلورية معرفة حالة الإجهاد والحبيبات وحدود الحبيبات عن طريق تركز الإجهادات على حدود الحبيبات. كما أن بنى الحبيبات ليست هي وحدها المسؤولة عن تركيز الإجهادات بل أيضاً كثافة تشكل التوائم وتوزعها مما يساهم بقوة في التشوه اللدن والتقسية التي تزيد من الإجهاد.

تكمن أهمية هذه الظواهر في تفسير تراكم التوائم وانزلاق الحبيبات قبل أن يتم الاتصال بجزيئات الحك عند تطور عملية الاهتراء. وتزيد موانع حدوث التوائم من القساوة الميكروية للحبيبات [15]. لكن تنخفض مرونة المادة لأن التوائم تسمح بالتشوه وتوقف التشكيل الموضعي عند الانزلاق وإن انخفاض المرونة فقط عند الانفعالات العالية [3]. نلاحظ في الشكل (3) منطقة تشوه شديد ومتطور في أسفل الثلم، والانفعالات اللدنة المتراكمة عالية وتصل إلى 150% بالقرب من السطح. تصل الانفعالات اللدنة العالية إلى عمق 50–150 ميكرومتر داخل المادة كما بينت المحاكاة عند أسفل الثلم.

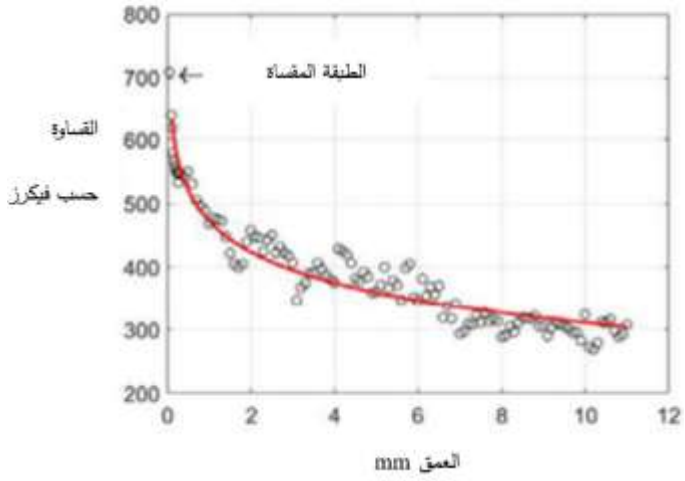
من خلال التشوه تتميز حافة الثلم بكسور حجمية توأمية عالية ولاتتم ملاحظة المرونة. تتراكم التوائم وتتجمع ككسور حجمية عالية جداً في أسفل الثلم مثل 0.5–0.85 بينما نلاحظ التوائم عند منطقة الحافة بحوالي 0.2–0.35. وفي الحالتين يكون الكسر الحجمي التوأمي عالياً بما يكفي لزيادة الإجهاد وقساوة المادة. تبين اختبارات القساوة لفولاذ هادفيلد قيم قساوة حوالي 250–700 HV في أسفل الثلم [33]. وليس للدونة المنخفضة والتوائم عند مناطق الحافة أي تأثير

على زيادة القساوة، من نتائج المحاكاة في عملنا أن الكسر الحجمي التوأمي 0.2–0.3 يزيد الإجهاد اللدن من 350 Mpa إلى 1000 Mpa [15,19].

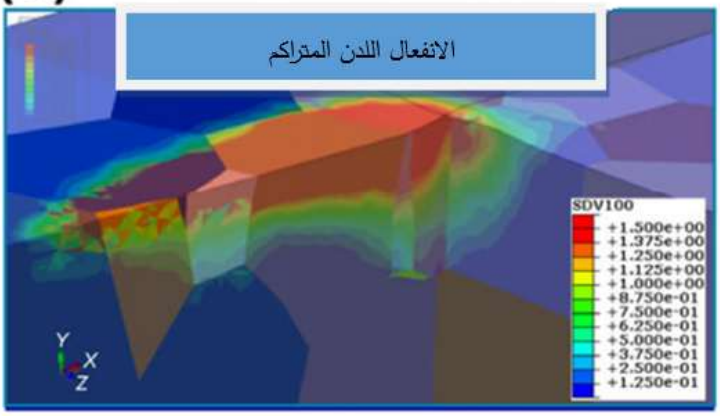
تبين في مناطق حافة الثلم كسور حجمية توأمية 0.2–0.3 والتي تكون مهيئة لتصبح أقوى بكثير من المادة الأساسية غير المشوهة. ومن المهم ملاحظة أن التشوهات الكبيرة في أسفل الثلم لاتحدث فوراً حتى في الحمولات العالية، والتي تم استعراضها في اختبارات التثليم [3,4]. مما يعني أن المادة يمكن أن تمر بمرحلة اللدونة حتى يحدث الفشل، وهذا لم تتم دراسته في النموذج. وفقاً لذلك، تعتبر المناطق المشوهة بشدة عند أسفل الثلم واللدنة عند الحافة مفيدة لمقاومة الحك في المادة. ويمكن أن يولد الحك عالي الإجهاد إجهاداً متبقياً في المادة. تبقى الطبقة المشوهة القريبة من السطح خاضعة للإجهاد المتبقي حتى بعد الانزلاق كما يبين الشكل (2). يكون إجهاد الضغط أعمق في السطح الثانوي في منطقة نهاية الاتصال، وكثافة الإجهادات غالباً هي إجهادات شد يمكن أن تضر بالسطح كأن تسبب فتح حدود الحبيبات. وقد بين الباحث [9] أن فتح حدود الحبيبات هو أحد مسببات فشل المادة.



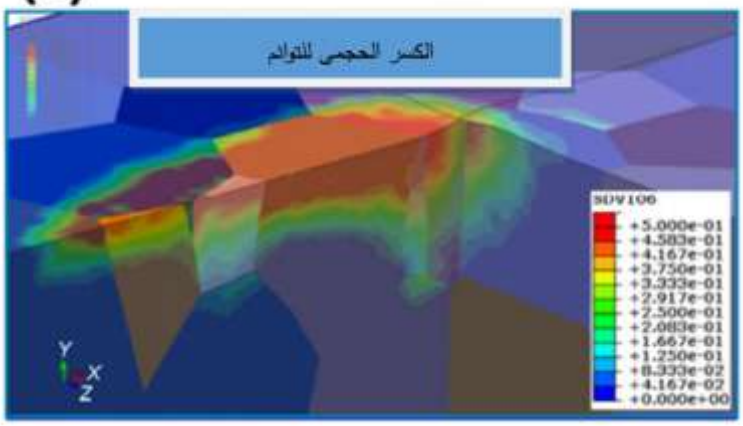
(c)

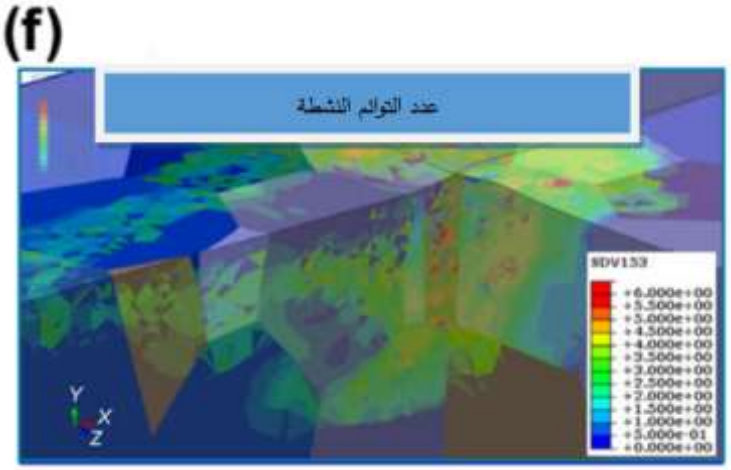

الطبقة المقساة
القساوة حسب فيكرز
800
700
600
500
400
300
200
0
2
4
6
8
10
12
العمق mm

(d)


الانفعال اللدن المتراكم
SDV100
+1.500e+00
+1.375e+00
+1.250e+00
+1.125e+00
+1.000e+00
+8.750e-01
+7.500e-01
+6.250e-01
+5.000e-01
+3.750e-01
+2.500e-01
+1.250e-01

(e)


الكسر الحجمي للتوائم
SDV100
+5.000e-01
+4.583e-01
+4.167e-01
+3.750e-01
+3.333e-01
+2.917e-01
+2.500e-01
+2.083e-01
+1.667e-01
+1.250e-01
+8.333e-02
+4.167e-02
+0.000e+00



الشكل (7) a مقطع عرضي في العينة عند الخدمة، b سطح التشوه، c علاقة العمق مع القساوة، d الانفعال اللدن البلاستيكي المتراكم، e الكسر الحجمي للتوائم، f عدد التوائم النشطة

يمكن للانتزاع أمام الثلم أن ينشط قص جزيئات الاهتراء لكن يعطي مرونة للمادة وهو متوقع الحدوث فقط في التشوهات الضخمة جداً. يلخص الشكل (7) ما تمت ملاحظته في التجارب التي قام بها الباحثون على عينة في فك أو كسارة مع نتائج للمحاكاة الحالية التي قمنا بها. يمكن ملاحظة الطبقة المهترئة المشوهة بشدة في كل من الحالتين المدروستين، إن التشوه الأكثر شمولاً هو المقيد بكسور للحبيبة الواحدة بسبب حجم الحبيبة الكبير أو مايصل إلى حبيبتين في بعض الحالات عندما يكون حجم الحبيبة أصغر. يمكن رؤية ذلك في المحاكاة والإختبارات التجريبية ويبين الشكل (7a) الطبقة المشوهة بشدة وانتشار التوائم المشوهة في عمق المادة حتى بضع ميليمترات. ومن المحتمل أن التوائم تشكلت خلال الحك عالي الإجهاد المتكرر وطاقة الصدم العالية التي توفرها عمليات التكسير المستمرة والعمل. بالرغم من أن المحاكاة مقيدة باتصال حكي وحيد فإن التوائم الميكروية تبدو واضحة حتى عدة حبيبات في عمق المادة حسب الشكل (7d). وتبين النتائج أن التوائم ميكروية بسبب الكسر الحجمي التوأمي الموضعي غير الكبير، لكن التوائم تمتلك توى تشكيل. وأحد الجوانب المهمة هو أن نوى التقسية تتأثر بالتوائم الميكروية بشكل واضح [10,11] بسبب التباعد عالي الكثافة بين المستويات التوأمية الرفيعة التي تشكل عوائق للانخلاعات. إضافة لذلك فإن عدد أنظمة التوائم النشطة عالٍ من 3 إلى 6 وهي بمثابة عوائق للانخلاعات وأنظمة التوائم الأخرى. ومن المحتمل زيادة التشوه تحت السطح بسبب الاتصالات اللاحقة وبسبب التقسية كما يبين الشكل (7c). بينت الدراسة الحالية إمكانية تشوه المادة وظهور التوائم المشوهة في شروط الحك بينما تشير اختبارات الشد والضغط ثلاثية المحاور أن التوائم تم منعها في اتجاهات محددة [15]. من وجهة نظر دراستنا يمكن اتباع نهج جديد في علم المواد خاصة باختلاف بنى الحبيبات لتقاوم الحك بظروفه المختلفة. يتميز تصميم السبائك بأن له الدور الرئيسي في التحكم بالتوائم المشوهة وآلية التشوه كما في التحول المارتنسيتي [15,18]، وذلك عند الحاجة لمقاومة الحك.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

1-تسمح المحاكاة بدراسة تأثير الاتجاهات البلوريات والبنى الحبيبية وربط آلية التشوه والتقسية تحت شروط الحك، مما يعطي احتمالات واسعة لهذه التقنية.

2–تم تشكيل طبقة مشوهة بشدة وقاسية بالقرب من السطح خلال الثلم الأولي، ويعد كل من التشوه الموضعي بفعل الانزلاق والتوائم الكثيفة سبباً للتقسية داخل وحول الثلم.

3–تؤثر بنية الحبيبات وتوجهها على تشكل التوائم عند السطح وتحته، ويعمل الحك عالي الإجهاد على تشكيل التوائم الميكروية في عمق المادة. وتحسن التقسية الموجودة سابقاً من مقاومة المادة للتشوه مع بقاء المرونة لدرجة كافية وبالتالي تحسين مقاومة فولاذ هادفيلد للحك عن طريق هذه الآلية عند انفصال حدود الحبيبات وانتهاء المرونة في طبقات السطح.

4–تحدث ظاهرة التوائم بشكل كثيف عند أسفل الخدش وباعتدال عند الانتزاع في حافة الثلم. تشمل الجزيئات المنزلقة التوائم في منطقة الانتزاع، ويتم التوزع الرئيسي للتوائم المشوهة خلال مرحلة الانضغاط بسبب الجزيئات المنزلقة، أمام وأسفل مكان الاتصال. ويلاحظ زيادة في الكسر الحجمي التوأمي عند الحافة الخلفية للاتصال والذي يعتمد على اتجاه الحبيبات وعلاقتها بتنشيط الأنظمة التوأمية، والكسر الحجمي المزدوج الموجود مسبقاً على الأنظمة الأخرى التي تعيق نشاط التوائم.

5–في حالة عدم انتظام الشد والضغط لفولاذ هادفيلد، يتم تقليل التوائم المشوهة عن طريق حالة الإجهاد ثلاثي المحاور عند شروط الحك.

التوصيات:

1–دراسة علاقة موضع الانفعال (تشوه القص) وتشوه جزيئات الاهتراء خلال التشقق الناتج عن القص.

2–دراسة الآليات التي تقلل التوائم وتمنع القص الأولي والانتزاع الميكروي الذي يشبه الاهتراء الميكروي في الحك.

3–دراسة حالة مرور الفولاذ السبائكي بمرحلة اللدونة وصولاً لمرحلة الفشل والتحطم.

4–دراسة الفشل بالقص لتحليل منطقة الانتزاع مع تمثيل عملية الفشل والضرر.

5–دراسة تأثير إضافة النيوبيوم أو المعالجات الحرارية.

References:

[1] R.Lencina, C.Caletti, K.Brunelli, R.Micone. Assessing wear performance of two high-carbon Hadfield steels through field tests in the mining industry. 2015, Procedia Materials Science, vol. 9, pp. 358–366, 2015.

[2] M.Lindqvist, C.M.Evertsson. Liner wear in jaw crushers. Minerals Engineering, vol. 16, no. 1, pp. 1–2, 2019.

[3] M.Lindroos, M.Apostol, V.Heino, K.Valtonen, A.Laukkanen, K.Holmberg, V.T.Kuokkala. The deformation, strain hardening, and wear behavior of chromium-alloyed Hadfield steel in abrasive and impact conditions, Tribology Letters, vol. 57, no. 3, p. 24, 2015.

[4] R.Sinha, A.K.Mukhopadhyay. Wear characterization and modelling of Mn-steel liners used in rock crushers, Perspectives in Science, vol. 8, pp. 374–376, 2016.

[5] J.Terva, V.T.Kuokkala, K.Valtonen, P.Siitonen. Effects of compression and sliding on the wear and energy consumption in mineral crushing, 2018, Wear vol. 398–399, pp. 116–126, 2018.

[6] D.Canadinc, H.Sehitoglu, H.J.Maier, Y.I.Chumlyakov. Strain hardening behavior of aluminum alloyed Hadfield steel single crystals, Acta Mater vol. 53, no. 6, pp. 1831–1842, 2018

[7] D.Canadinc, H.Sehitoglu, H.J.Maier, D.Niklasch, Y.I.Chumlyakov. Orientation evolution in Hadfield steel single crystals under combined slip and twinning., Int J Solids Struct vol. 44, no. 1, pp. 34–50, 2015

[8] Y.Dastur, W.Leslie. Mechanism of work hardening in Hadfield manganese steel, Metall Trans vol. 12, no. 5, pp. 749–759, 2012.
[9] B.Hutchinson, N.Ridley. On dislocation accumulation and work hardening in Hadfield steel, Scr Mater vol. 55, no. 4, pp. 299–302, 2010.
[10] O.Onal, C.Ozmenci, D.Canadinc. Multi-scale modeling of the impact response of a strain-rate sensitive high-manganese austenitic steel, Front Mater vol. 1, p. 16, 2014.
[11] S.R.Kalidindi. Modeling anisotropic strain hardening and deformation textures in low stacking fault energy FCC metals, Int J Plast vol. 17, pp. 837–860, 2013.
[12] A.A.Salem, S.R.Kalidindi, S.L.Semiatin. Strain hardening due to deformation twinning in α-titanium: Constitutive relations and crystal-plasticity modeling, Acta Mater vol. 53, no. 12, pp. 3495–3502, 2016.
[13] M.Lindroos, A.Laukkanen, V.T.Kuokkala, A crystal plasticity approach for shear banding in hot rolled high-strength steels, Metall Mater Trans A vol. 48, no. 11, pp. 5608–5615, 2019.
[14] K.P.Mingard, H.G.Jones, M.G.Gee. Metrological challenges for reconstruction of 3-D microstructures by focused ion beam tomography methods, J Microsc vol. 253, no. 2, pp. 93–108, 2014.
[15] W.Ludwig, A.King, P.Reischig, M.Herbig, E.M.Lauridsen ،S.Schmidt, H.Proudhon, S.Forest, P.Cloetens, S.R.Roscoat. New opportunities for 3d materials science of polycrystalline materials at the micrometre lengthscale by combined use of X-ray diffraction and X-ray imaging, Mater Sci Eng vol. 524, no. 1–2, pp. 69–76, 2016.
[16] C.Efstathiou, H.Sehitoglu. Strain hardening and heterogeneous deformation during twinning in Hadfield steel, Acta Mater vol. 58, no. 5, pp. 1479–1488, 2017.
[17] H.Chen, D.Zhao, Q.L.Wang, Y.H.Qiang, J.W.Qi. Effects of impact energy on the wear resistance and work hardening mechanism of medium manganese austenitic steel. Friction, 2017.
[18] S.L.Wong, M.Madivala, U.Prahl, F.Roters, D.Raabe. A crystal plasticity model for twinning- and transformation -induced plasticity, Acta Mater vol. 118, pp. 140–151, 2020.
[19] P.A.Sabnis, S.Forest, J.Cormier. Microdamage modelling of crack initiation and propagation in FCC single crystals under complex loading conditions, Int J Eng Sci vol. 312, pp. 468–491, 2020.
[20] O.Aslan, N.M.Cordero, A.Gaubert, S.Forest. Micromorphic approach to single crystal plasticity and damage, Int J Eng Sci, vol. 49, no. 12, pp. 1311–1325, 2021.
[21] A.Hatra, A.Salama, N.Al-Daher. Improving the mechanical properties (impact toughness and wear resistance) of drill bit steel and crusher hammers. Tuj-eng vol. 43, no. 2, May 2021.
[22] N.Aldaher, A.Hatra, A.Salamah. The Effect Of Heat Treatment On The Microstructure ،Impact Toughness And Hardness Of Hadfield Steels With Molybdenum And Chromium Additions. Syrian Journal for Science and Innovation; vol. 2, no. 2, Jul. 2024.
[23] N.Aldaher, A.Hatra, A.Salama. Increasing the impact toughness and wear resistance of Hadfield steel used in drill bits and crusher hammers by adding chromium and molybdenum, vol. 45, no. 6, pp. 173–185, 2025.
[24] B.Gumus, B.Bal, G.Gerstein, D.Canadinc, H.J.Maier, F.Guner, M.Elmadagli. Twinning activities in high-Mn austenitic steels under high-velocity compressive loading. Mater Sci Eng, vol. 648, pp. 104–112, 2015 [25] M.Lindroos, A.Laukkanen, G.Cailletaud, V.T.Kuokkala. Microstructure based modeling of the strain rate history effect in wear resistant Hadfield steels, Wear vol. 396–397, pp. 56–66, 2018.

[26] B Bal, B Gumus, D Canadinc. Incorporation of dynamic strain aging into a viscoplastic self-consistent model for predicting the negative strain rate sensitivity of Hadfield steel. J Eng Mater Technol vol. 138, no. 3, 031012, 2016.
[27] E.Biyikli, S.M.Toker, D.Canadinc. Incorporating the grain boundary misorientation effects on slip activity into crystal plasticity. Mech Adv Mater Struct, vol. 23, no. 8, pp. 865–872, 2016.
[28] M.Mirzajanzadeh, D.Canadinc. A microstructure-sensitive model for simulating the impact response of a high-manganese austenitic steel. J Eng Mater Technol, vol. 138, no. 4, 041004, 2016.
[29] K.Holmberg, A.Laukkanen, H.Ronkainen, K.Wallin, S.Varjus, J.Koskinen. Tribological contact analysis of a rigid ball sliding on a hard coated surface: Part I: Modelling stresses and strains. Surf Coat Technol, vol. 12–13, pp. 3793–3809, 2006
[30] X.Zhao, Y.Li, J.Zhang. Micromechanical modeling of abrasive contact behavior of austenitic high-manganese steel using three-dimensional crystal plasticity vol. 2, pp. 286–298, 2020.
[31] R.Kumar, A.Singh, P.Sharma. Experimental investigation on high-strength low-alloy steel behavior under dynamic shock loading. Metals, *vol. 13, no. 4, 663, 2023.*
[32] K.Tanaka, H.Suzuki, Y.Yamamoto. Micromechanical analysis of wear behavior in TiC particle-reinforced martensitic steel. International vol. 60, no. 11, pp. 2519–2527, 2020.
[33] L.Chen, Z.Wu & D.Li. Experimental and numerical study of wear and deformation behavior of TP316H steel under impact loading, Materials, vol. 15, no. 7, 2546, 2022.