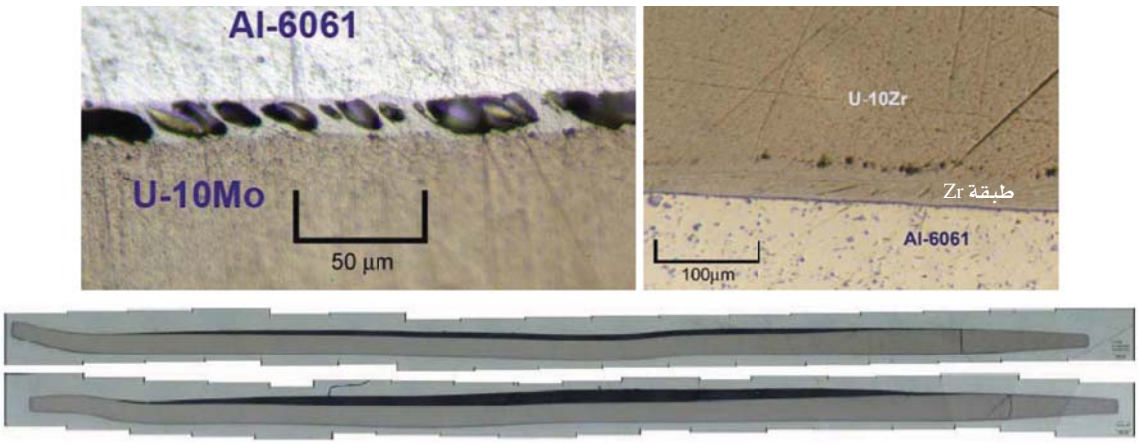

الشكل 8. صور مجهرية توضح تشكل طبقة التفاعل التي تؤدي إلى إزالة التصفح في السطح البيني في ورقة الوقود والتغليف (الصورة اليسارية العلوية)، دون إظهار طبقة الحاجز Zr (الصورة العلوية اليمينية). تظهر الصورتان السفليتان إزالة التصفح داخل المفاعل العائدة للتصنيع.

سطح U(Mo). وفي جهد تطويري نوعي للوقود من قبل وكالة الطاقة الذرّية الأرجنتينية، CNEA، استبدل غطاء الألمنيوم بخليطة زركونيوم. جُرِّب ربط الغطاء بالوقود بطرائق عديدة، مثل الربط بطور سائل عابر Transient Liquid Phase Bonding (TLPB) والربط بالاحتكاك Friction Bonding (FB) وبضغط إجهادي حار Hot Isostatic Pressing (HIP) وغير ذلك. وفي نهاية الأمر، تمّ اختيار عملية HIP لتطوير إضافي للوقود، مع أن العمليات الأخرى مستمرة بالتطور. لا يوجد حتى الآن وقود منتج على المستوى نصف الصناعي.

ثمة مفهوم خاص يتعلق بالوقود الأحادي ألا وهو الاستقرار الميكانيكي. ففي حين أن الوقود المبدّد، حيث إن ركازة الألمنيوم هي التي تملي الخصائص الميكانيكية وأنه يمكن بشكل خاص اعتبار اللوحات كلوحات ألمنيوم من وجهة نظر ميكانيكية، نرى أن هذه الحالة غير موجودة في لوحات الوقود الأحادي. إذ إن الإجهاد الذي يطبق على رقاقات الوقود، المتعلق بشكل أساسي بطريقة التصنيع وجزئياً بالاحتراق وبالمظهر الحراري في المفاعل، سيسبب إجهادات ميكانيكية تؤثر على اللوحة بكاملها. ولهذا، فإن قدّ اللوحة ومظهرها، إضافة إلى قوة الربط والتغير البطيء للخصائص تصبح عوامل شديدة الأهمية في السلوك لدى المقارنة مع الوقود المبدّد.

أظهرت النتائج الحديثة للتشعيع أن الوريقات المتشاركة باللّف U10Mo-Zr، المربوطة وفق طريقة HIP إلى الغلاف، تبدي سلوكاً متميزاً تحت التشعيع وتكون عملية التوصيف لتصميم هذا الوقود متطورة أيضاً. ستكون هناك حاجة لتطوير إضافي من أجل إدخال السموم النترونية ومظهر لوحات الوقود وتصنيف لوحات الوقود في بضعة مفاعلات. وحالياً، تمّ بنجاح تشعيع لوحات وقود أحادي بقدّها المكتمل في مفاعل الاختبار المتقدم Advanced Test reactor (ATR) في مختبر إيداهو الوطني.

5. استنتاجات

إن التبنّي العالمي لتحويل الأبحاث الأخيرة ومفاعلات الاختبار المستمرة في العمل حالياً باستعمال اليورانيوم المنخفض التخصيب بدلاً من اليورانيوم العالي التخصيب ($^{235}U > 20\%$) يتطلّب الانتقال من وقود عالي الكثافة إلى وقود كثافته عالية جداً. وللوصول إلى هذه المواصفة، تمّ اختيار خلائط الوقود U-Mo، سواء على شكل رقاقات وقود مبدَّد أم على شكل رقاقات وقود أحادي. وبمقتضى المشاكل الأولية المتعلقة بتفاعل U(Mo)-Al، سواء في الركازة (التبدّد) أم في الغلاف (الأحادي)، فقد حدث الآن تطوير إلى درجة أن توصيف الوقود ما يزال قيد الاهتمام المستمر.

إن إضافة Si إلى ركازة الألمنيوم تمثل وعداً مهمّاً لتصميم الوقود المبدّد وإن دراسات التشعيع تخضع لبرنامج LEONIDAS في مفاعل BR2. يُعقد أمل أكبر على استثمار عملية إضافة Si عبر تقنيات تغليف الحبيبات، الأمر الذي يوفر مميزات عدّة.

يبدو أن استعمال Zr كطبقة فاصلة بين الغلاف ورقاقة الوقود يلطف بنجاح كبير تفاعل تغليف الوقود في حالة الوقود الأحادي. وأظهرت عملية تصنيع الوقود بطريقة HIPing أنها تقود تقنياً إلى لوحات وقود مأمولة، لكن التصنيع في سوية نصف صناعية ما يزال يحتاج إلى إثبات. وستحتاج الخصائص الميكانيكية للوحات الوقود الأحادي إلى تقييم إضافي في المستقبل القريب.